



***Facultad
de
Ciencias***

Homogeneidad de la concentración de gas radón en el interior de una cámara de referencia

Concentration homogeneity of radon in a
reference chamber

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Manuel Núñez Gómez

Director: Carlos Sainz Fernández

Co-Director: Daniel Rábago Gómez

Julio - 2019

Índice

1. Introducción. Origen y efectos sobre la salud del radón	1
1.1. Naturaleza del radón	2
1.2. Metrología de radón	5
1.3. Estimación de la dosis y límite de la misma	9
2. Material y métodos	14
2.1. Cámara de radón	14
2.2. Fuentes de radón	16
2.3. Control de la concentración de radón	17
2.4. Monitores de radón	18
2.5. Medida del fondo	21
2.6. Evaluación de la estanqueidad de la cámara de radón	22
2.6.1. Técnica para la estimación de λ	23
2.7. Homogeneidad	23
2.7.1. Cálculo factor calibración	23
2.7.2. Medida	25
2.7.3. Corrección de la medida	26
2.8. Modelo matemático para la homogeneidad	27
2.8.1. Test de normalidad	27
2.8.2. Test de homogeneidad	28
2.9. Calibración de un monitor	29
3. Resultados	29
3.1. Fondos	29
3.2. Estanqueidad	30
3.3. Calibración de los monitores	32
3.4. Resultados homogeneidad	32
3.5. Calibración AlphaE	35
4. Discusión	37
5. Agradecimientos	39
Bibliografía	39

Resumen

En este trabajo se ha estudiado la cámara de radón del Laboratorio de Radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria. En particular se han evaluado las pérdidas que presenta la cámara y la homogeneidad de la concentración de radón en la región donde se realizan las medidas.

Tanto la organización mundial de la Salud (OMS) y la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) reconocen que este gas en altas concentraciones resulta perjudicial para la salud. Por ello es necesario tener detectores de radón que permitan un control preciso de la concentración del mismo, con el fin de monitorizar su concentración y ayudar a mitigar sus efectos.

Es importante que los laboratorios puedan calibrar los equipos de medición de forma precisa y es por ello todo el proceso de calibración se realice de forma controlada, por eso la homogeneidad de la distribución de radón dentro de la cámara debe conocerse, para poder tenerlo en cuenta a la hora de calibrar.

Para medir la homogeneidad se han utilizado diversos detectores de radón: un AlphaGUARD como monitor de referencia y varios Radon Scout. Se ha medido el fondo de estos detectores de radón y se ha hecho una medida de la homogeneidad repartiéndoles por distintos puntos de la cámara y realizando un test de varianza de sus medidas. Todas las medidas se han corregido para que fueran trazables al patrón de radón y por ello comparables entre si. El valor resultante para la homogeneidad $\xi < 3\%$.

Finalmente se ha calibrado un monitor de radón dentro de la cámara teniendo en cuenta la incertidumbre en la homogeneidad, así como una serie de factores que aportan incertidumbre a la medida y que son propios del proceso de calibración. El resultado ha sido la puesta a punto de un monitor cuyas medidas son trazables al patrón de radón y tienen en cuenta la comparación realizada en el propio laboratorio.

Palabras clave: Radón, Cámara de radón, Calibración, Metrología, Homogeneidad.

Abstract

In this work the radon chamber of the Laboratorio de Radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria has been studied. Particularly, leakage and homogeneity of the chamber have been evaluated in the region where the major part of the measurements are done.

According to the World Health Organization (WHO) and to the International Agency for Research on Cancer (IARC), the radon gas can be harmful and cause lung cancer. Due to this, is necessary to use radon monitors in order to have an accurate control of its concentration, in other to monitor the concentration and mitigate its effects.

For laboratories is important to be able to calibrate with accuracy the measuring systems and because of this, the calibration process needs to be under control. So, the homogeneity is going to be know to take into account in the calibration procedure.

Two monitors were used to measure the homogeneity: One AlphaGUARD as a reference monitor and some Radon Scout. The background of the monitors were measure and the homogeneity was estimate by placing the monitor on different positions of the chamber and doing an analysis of the variance of the records. All measures were corrects in order to make them traceables to the radon standard and comparable among them. The homogeneity result is $\xi < 3 \%$.

Finally, one monitor was calibrated with the radon chamber taking into account the homogeneity uncertainly and other factors characteristic of the calibration process. The result was the set up of a monitor which measurements are traceable to the radon standard and consider the comparison done in the laboratory.

Key words: Radon, Radon chamber, Calibration, Metrology, Homogeneity.

1. Introducción. Origen y efectos sobre la salud del radón

El descubrimiento de los rayos X por parte de Röntgen en 1895, y los estudios de Becquerel sobre la fluorescencia y la radiación al año siguiente, llevaron a Maria y a Pierre Curie a interesarse por el fenómeno de la radiactividad. En el año 1900 descubrieron que el aire que estaba en contacto con el mineral de radio se volvía radiactivo. Este fenómeno, al que bautizaron como emanación del radio, es el gas radón [1].

La radiactividad es un fenómeno natural por el cual los núcleos de los átomos pierden parte de su energía emitiéndola al exterior. Esto ocurre cuando la relación entre el número de nucleones en el interior no es estable y el núcleo tiende a desprenderse de ellos para alcanzar el equilibrio. Dependiendo de la naturaleza de la radiación se distingue: [2]

Radiación α aquella en la que se emite un núcleo de He, es decir dos neutrones y dos protones. Esta radiación al tener una carga elevada es muy interaccionante con las partículas del entorno por lo que su penetración es débil (bastaría con una lámina de papel para frenarla). En general basta con separarse unos pocos centímetros de distancia a la fuente emisora para que el aire haya sido capaz de detener la partícula.

Por otro lado se tiene la emisión β . Aquí el núcleo emite un electrón o positrón denotándose como β^- o β^+ , respectivamente. Para detener esta radiación bastaría con interponer una lámina de aluminio de unos pocos mm de espesor.

Al producirse una desintegración α o β el núcleo puede quedar en un estado excitado y emitir radiación electromagnética para alcanzar un estado de menor energía. Este fenómeno se conoce como radiación γ . Al ser menos interaccionante con la materia es capaz de penetrar mas en la misma siendo necesarias gruesas paredes de hormigón para detenerla.

Los elementos que emiten neutrones son un caso particular debido a que su interacción depende tanto de la energía de los mismos como del material con el que interactúan. Para los neutrones rápidos suelen utilizarse materiales como agua, hidrógeno, grafito, que les moderan, es decir, reducen su velocidad y energía. Una vez los neutrones han sido moderados es necesario absorberlos y para ello se utilizan materiales formados por elementos con una alta sección de absorción, como el boro [3].

El decaimiento de una sustancia radiactiva se estudia haciendo uso de una ecuación diferencial. Donde N es el número de átomos, λ es una constante independiente para cada isótopo llamada constante de desintegración y t es el tiempo.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene la ley de decaimiento radiactivo

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

La constante de desintegración indica la velocidad a la que se desintegran esos isótopos ($\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$). Debido a que es un decaimiento, es decir, dN es negativo, a mayor sea el valor de λ mas rápido decae ese isótopo.

De la ecuación (1) se puede extraer el tiempo necesario para que la mitad de los átomos de la muestra se hayan desintegrado. Este tiempo se conoce como periodo de semidesintegración, $T_{1/2}$, y se define como sigue:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

Esta relación se obtiene de resolver la ecuación (1) haciendo que $N = N_0/2$. De esta manera, al transcurrir un periodo de semidesintegración aún quedarán la mitad de los átomos por desintegrarse, luego una cuarta parte y así sucesivamente. Si bien es cierto que la radiación decae rápido al transcurrir unos pocos periodos de semidesintegración, siempre quedarán átomos por desintegrarse.

Otra magnitud temporal relacionada con la constante de desintegración es la vida media τ .

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

τ equivale al tiempo promedio en el que se desintegra un átomo de ese isótopo. La vida media siempre será mayor que el periodo de semidesintegración.

La actividad es la velocidad con la que se desintegra un elemento radiactivo. Se define actividad como $A = N\lambda$. Multiplicando la ecuación (1) por la constante de desintegración se tiene :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

La unidad del sistema internacional para la actividad es el Becquerelio (Bq), 1 Bq indica que se está produciendo una desintegración cada segundo.

En este trabajo se va a estudiar el gas radiactivo radón, en particular se va a estudiar su concentración en una atmósfera. Al ser radiactivo, la concentración se va a expresar en unidades de actividad por unidad de volumen. En el sistema internacional se utiliza Bq/m³.

1.1. Naturaleza del radón

Dentro de los elementos radiactivos que se encuentran en la naturaleza, el radón cobra importancia debido a que es el mayor contribuyente a la dosis recibida por los humanos a causa de su acumulación en espacios cerrados como pueden ser viviendas, lugares de trabajo u otros emplazamientos como cuevas, minas o balnearios.

Es un elemento monoatómico que en la tabla periódica se encuentra en la columna de los gases nobles. Su temperatura de solidificación es -71°C y la de ebullición -62°C , por lo que normalmente se encontrará en estado gaseoso. Tiene una densidad mayor que la del aire 9,73 kg/m³ y un alto coeficiente de disolución en líquidos como el agua.

Su interacción química con otros compuestos es principalmente mediante enlaces de Van der Waals, por ello esta es baja lo que dificulta su detección por estos métodos. En cambio, desde el punto de vista nuclear es un elemento radiactivo emisor de partículas α , las cuales tienen una gran interacción con la materia.

En la naturaleza se pueden encontrar tres isótopos del radón con una vida media significativa contenidos en la cadena de desintegración de otros elementos:

Comúnmente se denomina radón al isótopo que está formado por 86 protones y 136 neutrones (^{222}Rn). Este isótopo forma parte de la cadena de desintegración del ^{238}U , y su progenitor directo es el ^{226}Ra que tiene un periodo de semidesintegración $T_{1/2} = 1600$ años. De igual manera el radón con $T_{1/2} = (3,8215 \pm 0,0002)$ días decae al ^{218}Po [4]. A partir de este valor se puede calcular el valor de la constante de desintegración haciendo uso de la ecuación (2), de forma que $\lambda_{\text{Rn}} = (0,0075575 \pm 0,0000004) \text{ h}^{-1}$.

Dentro de la cadena de desintegración del ^{232}Th está el torón (^{220}Rn) con $T_{1/2} = (55,6 \pm 0,1) \text{ s}$. Este isótopo proviene directamente del ^{224}Ra y el actinón con $T_{1/2} = (3,96 \pm 0,01) \text{ s}$ que por su parte proviene del ^{223}Ra que está dentro de la cadena del ^{235}U [1].

La cadena de desintegración de los tres finaliza en los isótopos de plomo ^{206}Pb , ^{208}Pb y ^{207}Pb respectivamente. Estos átomos son estables, de hecho los 82 protones del plomo lo convierten en un número mágico pero en el caso del ^{208}Pb al tener 126 neutrones resulta ser doblemente mágico. Que un núcleo tenga un número mágico de protones o de neutrones es una propiedad de la física nuclear por lo cual el núcleo que lo sea tendrá una estabilidad mayor en comparación con otros núcleos con similar número de nucleones [2]. La cadena de desintegración del ^{238}U al completo se muestra en la figura 1

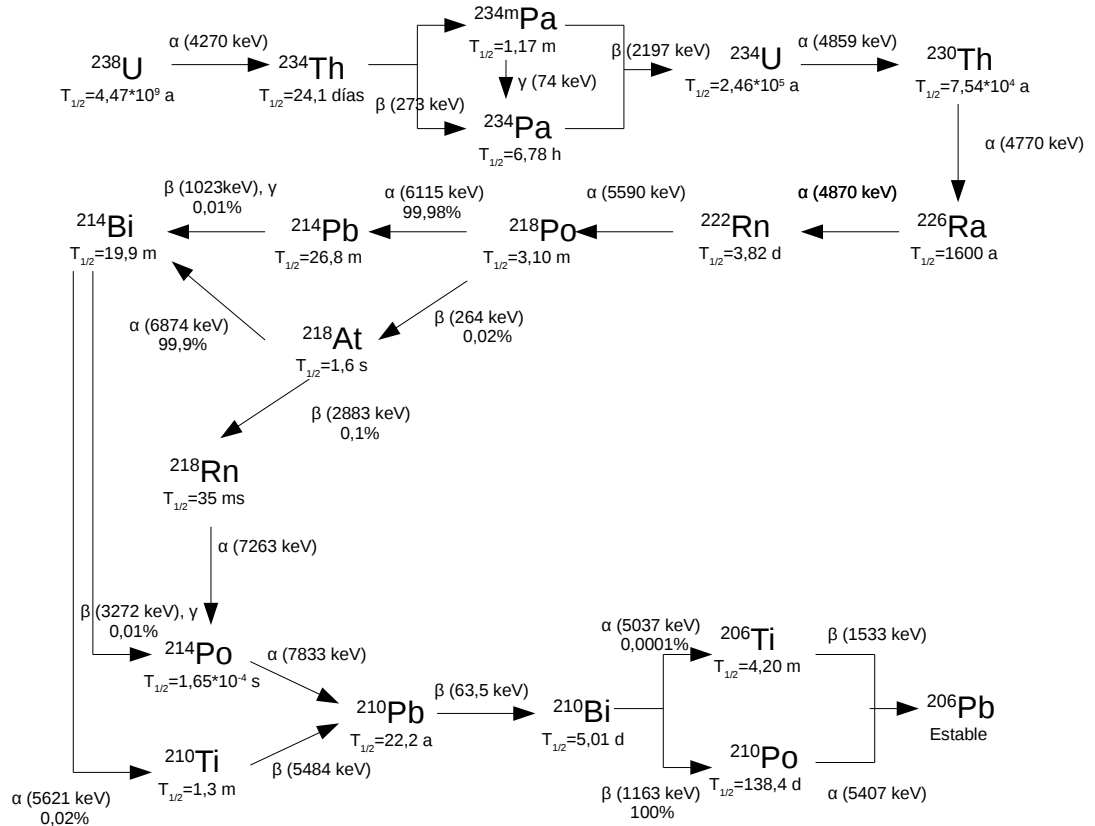


Figura 1: Cadena de decaimiento del ^{238}U incluyendo al radón y sus descendientes. Al mismo tiempo se incluye el tipo de decaimiento con la energía del mismo, el periodo de semidesintegración y la probabilidad de decaimiento [5]. En los emisores γ no se incluye la energía debido a que el esquema de decaimiento es complejo e incluye varias energías.

El radón llega hasta nosotros a través del suelo ya que todas las tierras tienen una cierta concentración de uranio y por ello de radio, este último al desintegrarse libera gas radón que puede salir de la roca y ascender por los poros de la tierra. La difusión de este gas y por tanto su emanación de la tierra no será constante ya que dependerá de factores como la porosidad del terreno, la concentración de radio en el mismo o condiciones externas como la humedad proveniente de la lluvia.

De esta manera, y dependiendo de la composición del terreno, la concentración de cada uno de los tres isótopos del radón será diferente. Si el radón es capaz de ascender a través del terreno y llegar a los bajos de una edificación, se filtra a través de los materiales de construcción quedándose confinado dentro del edificio y contaminando la atmósfera interior.

Como este proceso de difusión lleva un tiempo y debido a los periodos de semidesintegración tan cortos del ^{220}Rn y del ^{219}Rn , apenas quedarán trazas de torón al pasar una hora y del actinón en solo un minuto. Por ello se habrán desintegrado antes de llegar a la superficie. Por eso se suele considerar que es el ^{222}Rn el isótopo principal, debido a que es el que con mayor concentración llegará a los lugares donde puede ser perjudicial para la salud, a excepción de aquellos lugares donde haya tierras con muy alto contenido en torón donde este gas también contribuirá a la contaminación.

Cuando el radón se desintegra, sus primeros descendientes necesitan un tiempo para alcanzar el equilibrio, como se muestra en la figura 2.

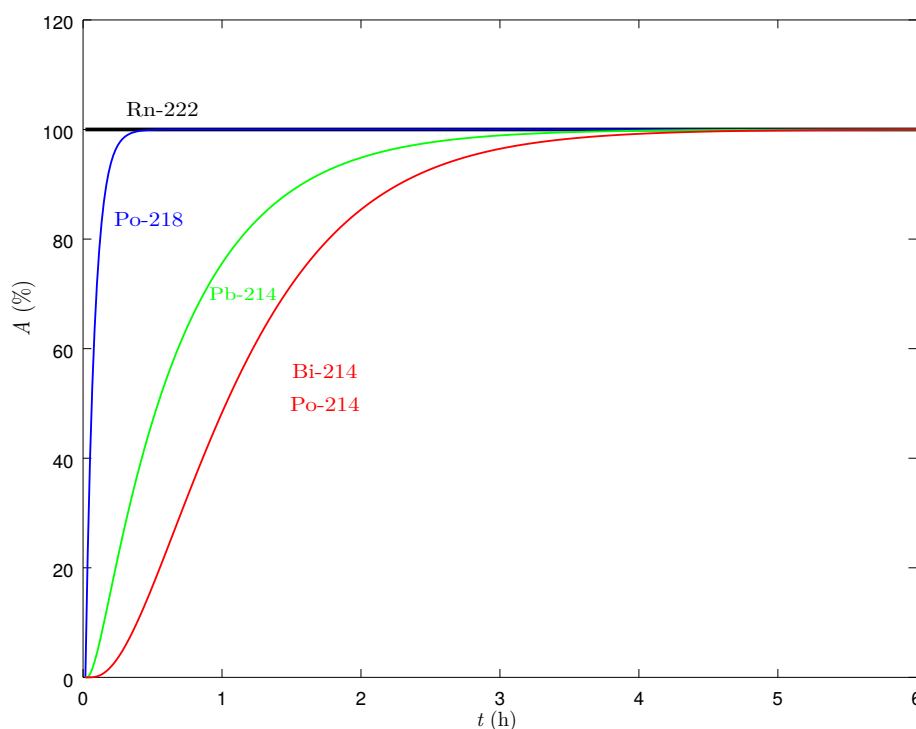


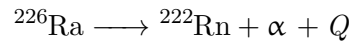
Figura 2: Tiempo necesario para alcanzar el equilibrio de la actividad de los primeros y mas importantes descendientes del radón.

Suponiendo una concentración estable de radón (línea negra), se representa el tiempo que tardarían sus descendientes en alcanzar una actividad estable. El ^{218}Po en un tiempo de 20 minutos se considera que ha alcanzado un 99,3 % de la actividad máxima. El ^{214}Pb alcanza su actividad máxima al pasar 3 horas y 17 minutos. Finalmente se representa ^{214}Bi y ^{210}Po se han representado juntos debido a que el ^{214}Po tiene un $T_{1/2} = (163,72 \pm 0,27) \mu\text{s}$, por lo que realmente es como si se desintegrara inmediatamente después que el ^{214}Bi . La saturación de estos elemento se habrá alcanzado a las 4 horas.

Estos elementos son importantes para la detección debido a que son elementos sólidos que en el caso de ser capturados se quedarán fijados en un lugar, al contrario que el gas radón que fluye.

Además los últimos estudios asignan al radón un 48 % de la dosis recibida mientras que al torón un 4 %. De ahí que el radón sea el radionucleido mas importante para estudiar y se use la denominación radón para ese isótopo [6].

Al desintegrarse un átomo de radio ocurre lo siguiente:



Donde Q es la energía liberada en la reacción debido a la diferencia de masa entre los descendientes y el átomo original. Esta energía se liberará como energía cinética asociada a los productos de la desintegración. Debido a los principios de conservación de la masa y de la energía, el reparto de energía cinética se produce como sigue:

$$\begin{cases} \bar{P}_\alpha + \bar{P}_{\text{Rn}} &= 0 \\ E_\alpha + E_{\text{Rn}} &= Q_\alpha \end{cases} \rightarrow Q_\alpha = \frac{P_\alpha^2}{2m_\alpha} + \frac{P_{\text{Rn}}^2}{2m_{\text{Rn}}} = \frac{P_\alpha^2}{2} \left(\frac{1}{m_\alpha} + \frac{1}{m_{\text{Rn}}} \right) = \frac{P_\alpha^2}{2m_\alpha} \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_{\text{Rn}}} \right)$$

Dado que:

$$\frac{m_\alpha}{m_{\text{Rn}}} \approx \frac{4}{222} \ll 1$$

$$E_\alpha \cong \frac{P_\alpha^2}{2m_\alpha} = \frac{Q_\alpha}{1 + \frac{m_\alpha}{m_{\text{Rn}}}} \simeq Q_\alpha \left(1 - \frac{m_\alpha}{m_{\text{Rn}}} + \left(\frac{m_\alpha}{m_{\text{Rn}}} \right)^2 - \dots \right)$$

Por este razonamiento, el radón solo se llevará un 2 % de la energía total de la desintegración. Dado que $Q \approx 5 \text{ MeV}$, $E_{\text{Rn}} \approx 100 \text{ kev}$, energía que puede causar que este átomo salga del sólido donde está contenido y pueda comenzar a difundirse libremente.

1.2. Metrología de radón

Según la EURAMET un patrón de medida “es una medida materializada en forma de instrumento de medida, material de referencia o sistema de medida concebido para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud, de modo que sirva de referencia” [7].

Un patrón primario será aquel cuyo valor surja de la aplicación directa de la definición de la magnitud física y que sea medido con la mayor precisión metrológica posible, siendo por ello aceptado sin necesidad de referirse a otros patrones de medida. Se tratan de establecer

estos patrones mediante medidas absolutas de la magnitud [8].

Un patrón secundario en cambio será aquel patrón establecido por la comparación de la medida de el mismo con el patrón primario. De esta manera se podría comparar este patrón secundario con otro para establecer un patrón terciario. Y así sucesivamente.

La trazabilidad consiste en la concatenación de diversas comparaciones, acumulando las sucesivas incertidumbres procedentes de las mismas, de manera que cada resultado lleve incluido todas las incertidumbres de las comparaciones anteriores hasta llegar al patrón primario. Que una medida sea trazable indica que de haberse medido con otro patrón que también fuera trazable, los resultados entre ambos serían compatibles.

Existen laboratorios intermedios en este proceso, que suelen estar acreditados, y que garantizan que las comparaciones entre patrones se hagan en las condiciones correctas tratando de minimizar el error de la calibración. En la figura 3 se muestra un esquema de como es el procedimiento desde la creación del patrón hasta la medida.

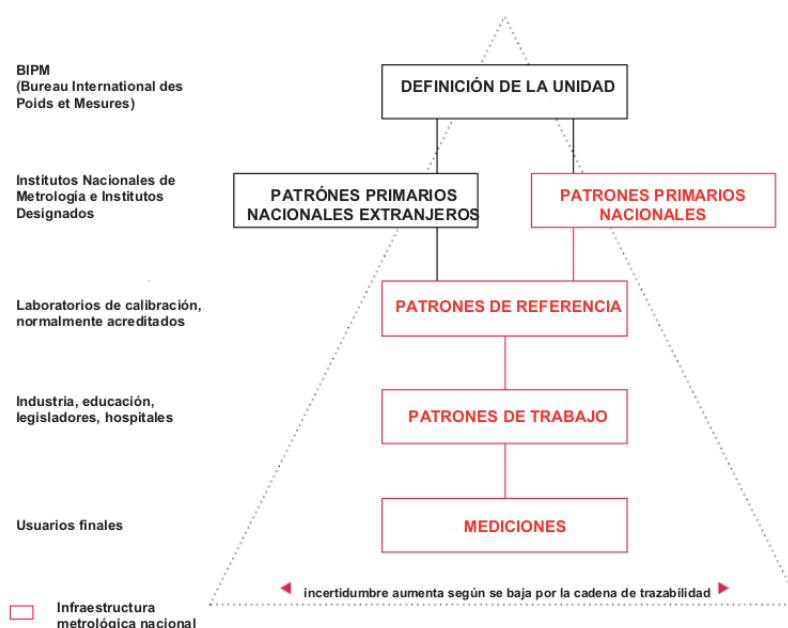


Figura 3: Procedimiento de calibración seguido por los diversos laboratorios que realizan medidas de una magnitud hasta que se produce la medida final por parte del usuario [7].

Para cumplir con los requisitos metrológicos en el campo de la medida de la concentración del gas radón, es necesario tener un lugar en donde se pueda crear una atmósfera controlada con una determinada concentración de este gas para poder verificar el funcionamiento de los equipos de medición y realizar las correcciones necesarias a los mismos. La importancia de la cámara de radón radica en que permite la intercomparación y calibración de los detectores dentro de un recinto controlado.

Dado que es necesario que la exactitud y corrección de la medida no sea algo independiente entre los distintos laboratorios y empresas que realicen este tipo de medidas debe existir un proceso de intercomparación y calibración que se ejecute de manera periódica entre los

distintos laboratorios que realizan medidas de este gas.

Existe una serie de laboratorios que disponen de los medios necesarios para crear un patrón de radón y realizan intercomparaciones entre ellos para establecer el valor de referencia mediante distintas técnicas. Algunas de estas se van a explicar a continuación [9] :

Antes del año 1995, todas las técnicas que se utilizaban para la creación de un patrón de radón estaban basadas en medidas indirectas. Estas medidas partían generalmente de utilizar una muestra patrón de ^{226}Ra y a partir de su actividad, obtener la concentración de ^{222}Rn . Otra técnica que se utilizaba era mediante medidas de la desintegración γ de una fuente supuesta puntual de ^{226}Ra . Estas técnicas tenían una reproducibilidad de un 0,7 y un 2,2 %, respectivamente, siempre y cuando se realizaran dentro del mismo laboratorio y con el mismo procedimiento experimental.

El inconveniente de este método surgía cuando se comparaban dos patrones de distintos laboratorios, debido a que la discrepancia entre ambas medidas era del orden del 20 %.

Desde 1995 se disponen de procesos absolutos de detección. El que actualmente es mas preciso se basa en técnicas de conteo mediante ángulo sólido definido. Esta técnica consiste en difundir el radón proveniente de una fuente de radio dentro de una cámara de vacío. En su interior se sitúa un espectrómetro de alta resolución para partículas α enfrentado a una superficie. Experimentalmente se habrá medido el ángulo solido existente entre esta superficie y el detector.

La temperatura en el interior se establece en 50 K lo que provoca que la presión de vapor del radón baje varios órdenes de magnitud, quedando el radón condensado en la superficie y pudiéndose hacer un detección directa de la desintegración tanto del radón como de sus descendientes ^{218}Po y ^{214}Po . Los detectores utilizados tienen una resolución del orden de decenas de kev y debido a la naturaleza de las partículas α la eficiencia en la detección es máxima.

Actualmente, esta técnica permite tener unos patrones precisos con una reproducibilidad menor del 0,28 % de error relativo y lo que es mas importante, unos resultados compatibles con los patrones obtenidos por técnicas absolutas realizadas por otros laboratorios.

Un inconveniente de este tipo de medidas que se debe tener en cuenta es garantizar la no destrucción del patrón. Es decir, se debe poder trasladar el patrón primario a otro lugar donde otro detector de radón pueda realizar medidas y de esta forma se calibre un patrón secundario cuya medida esté relacionada con el primero. Conseguir esto supone un aumento del error relativo en el patrón secundario que está entre el 0,5 y el 1,1 %[10].

Una vez que el valor es aceptado se dispondrá de un patrón primario. A partir de esa medida se calibran otros detectores de radón en función del patrón. El hecho de calibrar estos detectores en función de otros que de forma directa o indirecta su medida esté referida a un patrón de radón, garantiza la fiabilidad de la misma, es decir, el valor medido es trazable al patrón primario de radón. Este proceso debe realizarse de manera periódica para garantizar la medida del factor de calibración al mismo tiempo que se conserva la trazabilidad de la medida.

Como se puede presuponer, a mas pasos intermedios tenga este proceso mayor es la incertidumbre asociada a la calibración y por tanto a la medida.

Para calibrar los equipos se utilizan cámaras en las que se crea una atmósfera controlada y se introduzcan los equipos para comparar las medidas que realiza cada uno. La norma IEC 61577 establece los criterios que deben cumplir las cámaras de radón de los laboratorios de referencia. Se resumen estos criterios mínimos en la figura 4.

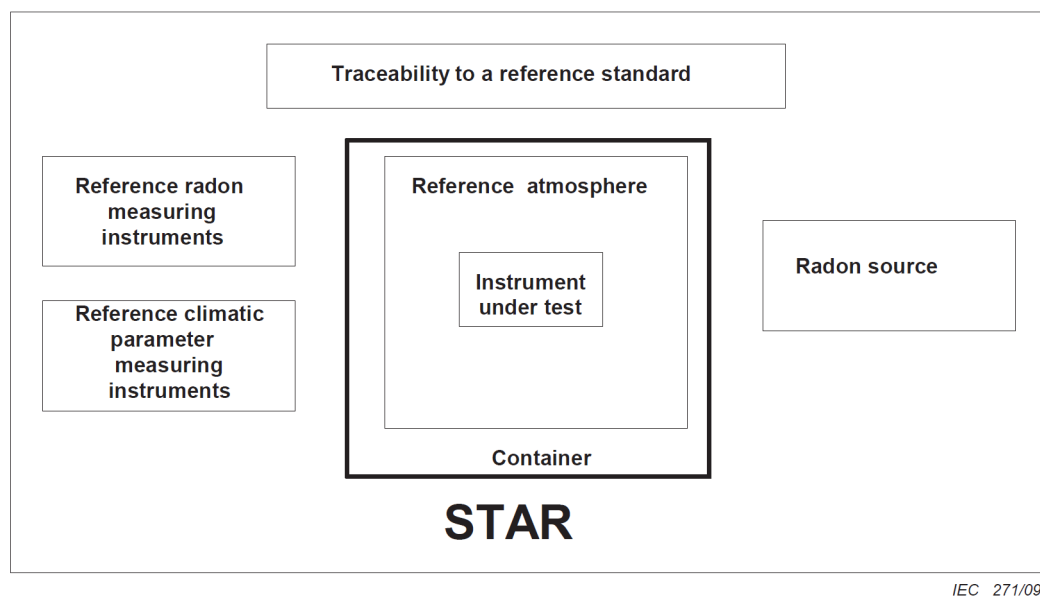


Figura 4: Funcionalidades mínimas que debe cumplir una cámara de radón para poder estar homologada como cámara de referencia según los criterios de la International Electrotechnical Commission (IEC).

Estos son los requerimientos mínimos que son alcanzados por ejemplo por la cámara de radón disponible en el LaRUC.

A parte de estos criterios hay otros que la norma recomienda que debe tener una cámara de radón. Estos son: un sistema de creación o utilización de patrones, sistema de creación y medida de aerosoles, sistema para controlar los parámetros ambientales, y un sistema para controlar la ventilación y la exhalación.

Estos criterios extra son cumplidos por las siguientes cámaras:

El laboratorio Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania dispone de una cámara de referencia que además incluye en su interior un sistema de detección absoluta de la concentración de radón, en concreto el que utiliza la condensación del gas en una pared al disminuir la temperatura. Debido a que la cámara puede llegar a temperaturas de 25 K, temperatura menor que la necesaria para que haya una alta condensación [11].

Una vez se calibra una concentración de manera absoluta y se obtiene un patrón, la atmósfera creada debe transportarse a un recipiente que la contenga sin pérdidas. Para esto se usan ampollas de cristal donde se almacena el gas haciendo uso de una bomba

de vacío. Conociendo la concentración de esa atmósfera en el momento de creación de la misma se podría calibrar un patrón secundario, teniendo en cuenta el error que se introduce al transferir el gas.

Estas ampollas pueden utilizarse para realizar comparaciones entre laboratorios que cuentan con la tecnología necesaria para crear patrones de radón. De estas experiencias se puede mejorar la incertidumbre en la creación de un patrón de radón y consecuentemente mejorar las medidas que dependan del mismo. Este laboratorio realiza intercomparaciones a su vez con otros laboratorios que crean patrones primarios como el National Institute of Standards and Technology (NIST) de EEUU o el National Physical Laboratory (NPL) de Reino Unido.

A nivel nacional existe una cámara de referencia en la Universidad Politécnica de Cataluña [12]. Esta cámara cumple los criterios marcados en la figura 4.

El patrón utilizado en esta cámara no está creado en el propio laboratorio si no que es un patrón de radón creado en el PTB y transportado hasta la cámara, donde ya se utiliza para calibrar los monitores. El patrón consiste en la ampolla de cristal mencionada anteriormente. Esta contendrá una concentración de gas proveniente del patrón. A este aire se le hace circular dentro de la cámara y se mide la concentración en su interior. Dado que el valor de la concentración es conocido, este monitor pasaría a ser un patrón secundario trazable al patrón del PTB.

Todo este procedimiento se realiza con sumo cuidado teniendo en cuenta todos los factores que afecten tanto a la concentración como a la detección. Debido a que la cámara tiene sistemas de control de humedad y temperatura al mismo tiempo que sistemas de ventilación se garantiza que el entorno sea lo mas estable posible.

Con el patrón secundario establecido se pueden realizar ejercicios de calibración de otros monitores con respecto a ese. Al mismo tiempo, existen campañas impulsadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para realizar ejercicios de intercomparación entre los distintos laboratorios españoles que realizan medidas de concentración de Radón, entre ellos se encuentra el Laboratorio de Radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC).

Sin embargo en este caso el patrón utilizado es un monitor de radón calibrado en el BfS, laboratorio secundario de calibración.

Como puede extraerse de todo este procedimiento, la exactitud de las medidas de radón depende del esfuerzo de los laboratorios que trabajan con medidas de radón para mejorar sus propias medidas en función de comparar sus resultados con los de otros laboratorios bajo las mismas condiciones. Gracias a esto la medida de radón es cada vez mas precisa, lo que permite mejorar estudios que dependen de la misma.

1.3. Estimación de la dosis y límite de la misma

La radiación es peligrosa para los individuos debido a que por su poder ionizante puede causar alteraciones químicas en el tejido vivo. Estas modificaciones podrían producirse en el material genético, provocar cambios en la cadena de ADN y desembocar en un cáncer

o en una mutación heredable por los descendientes.

El radón está considerado como peligroso para la salud humana desde 1988 al ser catalogado como cancerígeno por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) [5]. Por primera vez los riesgos fueron observados en mineros debido a que en el interior de las minas se alcanzan concentraciones muy elevadas de radón, pero después se extendió a hogares donde algunos resultados también eran ser muy altos.

La OMS [13] atribuye al radón entre un 4 y 13 % de los casos de cáncer de pulmón, siendo la causa principal de esta enfermedad en personas no fumadoras e incrementando el riesgo de padecer cáncer en fumadores.

Se han realizado estudios de cohortes desde 1960 los cuales se han intensificado a partir de 1980. Los primeros se realizaron en trabajadores de minas donde se encontró un aumento del 1,02 % de la tasa de muerte por cáncer de pulmón en los no fumadores y del 0,48 % en los fumadores, por cada mes de trabajo con exposición a radón. Siendo aún así mayor la tasa de muerte de aquellos que fuman.

A nivel europeo se han realizado estudios sobre el público general para estimar el riesgo de la exposición prolongada a bajas concentraciones de radón. Los estudios evidencian la existencia de un riesgo de padecer cáncer de pulmón que aumente un 16 % por cada 100 Bq/m³ que aumenta la concentración de radón.

El principal peligro radica en los espacios cerrados, especialmente en los sótanos, bajos y primeras plantas dado que el radón al llegar a la superficie se puede filtrar por los materiales de construcción concentrándose en el interior, pero es mas difícil que ascienda. Además dado las mejoras en el aislamiento de las viviendas en puertas y ventanas, la ventilación de interiores de ve reducida y las concentraciones que se alcanzan son mayores.

La directiva 2013/59 del EUROATOM señala que los estudios epidemiológicos han mostrado evidencia de que una concentración superior a 100 Bq/m³ aumenta significativamente el riesgo de padecer cáncer de pulmón, riesgo que se incrementa además si la persona expuesta es fumadora. Por ello se establece una concentración límite recomendada a los estados miembros de 300 Bq/m³ para los espacios interiores. Cuando la concentración media en el espacio sea superior ha este valor es necesario informar y tomar medidas para reducirla, en el caso de que no se alcance también es importante realizar esfuerzos por reducir la concentración a fin de minimizar el riesgo

La directiva también indica que debe disponerse de un plan nacional para aplicar, tanto en viviendas como en lugares de trabajo, donde se supere ese umbral. Estas medidas pueden ir desde la limitación y el control del tiempo de exposición en el lugar a medidas correctivas que tengan por objetivo la reducción del riesgo de padecer cáncer de pulmón.

Para el cálculo de la radiación absorbida se hace uso del Gray (Gy) que relaciona la cantidad de radiación absorbida por unidad de masa del tejido o de un material cualquiera. $1\text{Gy} \equiv \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Para el uso en humanos esta unidad no aporta una información completa debido a que cada tejido humano es sensible de manera diferente a la radiación y además cada tipo de radiación afecta de forma distinta. Por ello es necesario introducir otra unidad que tenga en cuenta estos elementos y permita hacer una mejor estimación del daño.

Dentro del sistema internacional es el Sievert (Sv) y tiene las mismas unidad que el Gray, pero su valor cambia debido a que se multiplica por un factor concreto para cada tejido y tipo de radiación.

$$1\text{Sv} = \text{Gy} * Q$$

Además, es importante tener en cuenta la velocidad a la que se producen estos daños, debido a que existen mecanismos para reparar el daño radiactivo. Se debe poder diferenciar entre los dos tipos de efectos que existen, en primer lugar tenemos los procesos deterministas que son los que ocurren con altas dosis efectivas de radiación. En estos casos es posible cuantificar el daño que se produce y además se sabe que los efectos crecen de forma lineal con la dosis inducida. Se suele establecer que un valor de dosis de 5-6 Sv provocaría la muerte.

Y los estocásticos por otra parte son mas difíciles de cuantificar dado que los efectos de sufrir esta radiación solo se pueden observar al cabo de muchos años, por lo que son necesarios estudios epidemiológicos grandes y costosos que a día de hoy no han proporcionado suficiente información. Dentro de estos está el radón el cual va haciendo un daño biológico de manera lenta y los efectos de su exposición se manifiestan en periodos de tiempo largos.

Actualmente hay 4 hipótesis sobre los daños que causan las exposiciones bajas:

En los trabajos de riesgos de población se suele aplicar el modelo lineal sin umbral (LNT) que afirma que el riesgo crece linealmente con la exposición y solo se anula cuando esta es igual a cero.

Hipersensibilidad, que según estos modelos el modelo LNT subestima el riesgo dado que la dosis podría ser mas dañina.

Hay también modelos que sugieren que existe un umbral debajo del cual no habría daño. E incluso hay modelos que afirman que existen efectos hométicos en la salud, es decir, las bajas dosis serían beneficiosas [14].

Debido a que los estudios no muestra evidencia de cual es el modelo que hay que aplicar, a la hora de la prevención y de crear normativas y legislación se suele suponer la hipótesis del modelo lineal sin umbral.

Estas 4 teorías se muestran en la figura 5.

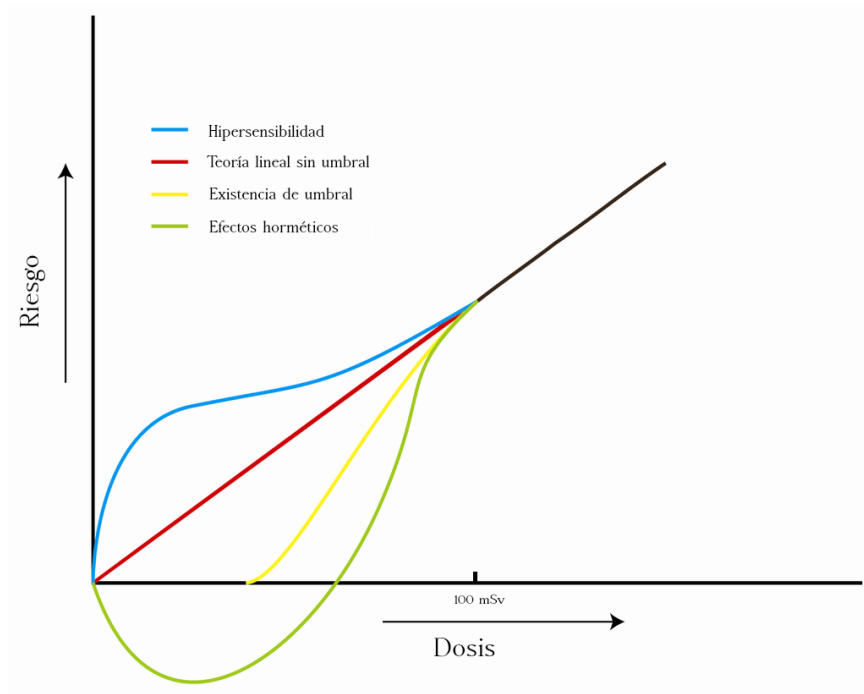


Figura 5: Los cuatro modelos principales para dosis bajas de radiación. A partir de 100 mSv existe evidencia de que los efectos son deterministas y la relación dosis-riesgo es lineal [14].

Los seres humanos vivimos en un entorno en el cual la radiación está presente y es inevitable estar en contacto con fuentes radiactivas. Una parte de la contribución a la dosis tiene un origen natural y otra es artificial. Separándolas por origen, es el radón la fuente que mayor contribución a la dosis humana tiene, tal y como muestra la figura 6

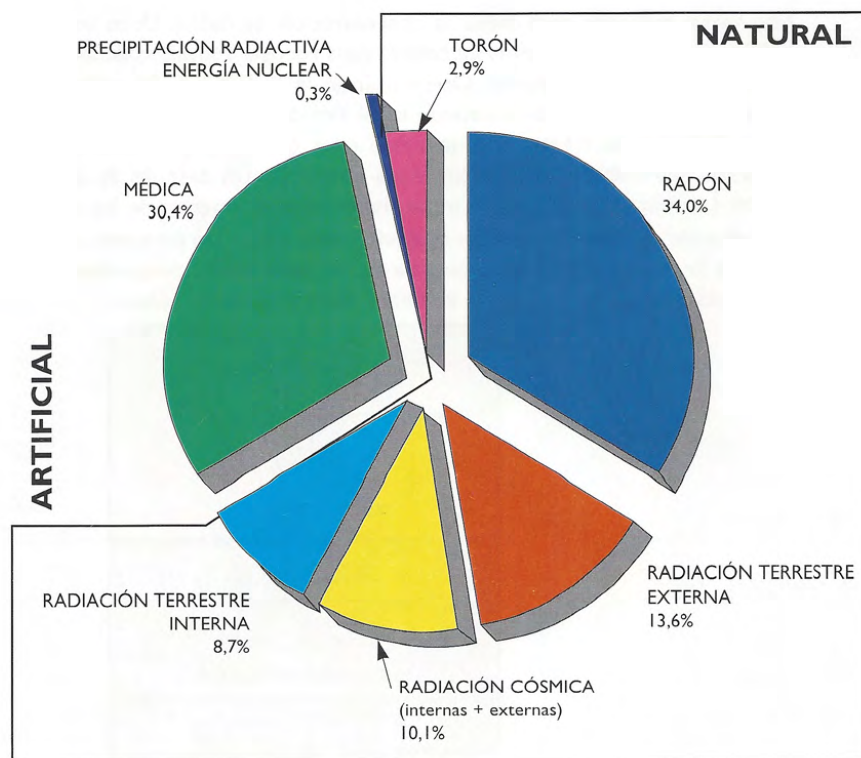


Figura 6: Contribución de las distintas fuentes de exposición, de origen natural y artificial, a la dosis recibida por la población [15]. De media se toma que la radiación de origen natural contribuye con 2,4 mSv anualmente y en promedio a la población española, debido al desarrollo sanitario, se estima en 1,3 mSv al año [16].

Cuando se respira en una atmósfera con un cierto contenido de radón, parte de este se disuelve en la sangre o se desintegra en el interior, pero no causa grandes daños debido a que es una porción muy pequeña. La mayor parte del gas vuelve a salir al exterior al exhalar. Por tanto el radón en si mismo no es perjudicial. Lo que causa el daño son sus descendientes los que al desintegrarse el radón pueden adherirse a diversos aerosoles, humo o polvo y al ser respirados quedar adheridos a los tejidos de las vías respiratorias y ya ahí causar un daño al estar en contacto directo.

Generalmente la dosis recibida se calcula a partir de estudios epidemiológicos. Estos modelos se basan en los daños a la población causados por exposiciones como la de superviviente a Nagasaki e Hiroshima, que fueron principalmente rayos γ . Por ello se están diseñando diversos modelos para estimar la dosis directamente a partir de la concentración medida y de otros parámetros como la presencia de distintos tipos de aerosoles en esa atmósfera [17].

Desde la publicación 137 de la ICRP, se recomienda utilizar los coeficientes de dosis provenientes de la aproximación dosimétrica de manera que el daño causado por el radón y sus descendientes al acumularse en los tejidos se puede calcular de manera directa y no mediante modelos epidemiológicos.

2. Material y métodos

2.1. Cámara de radón

En el LaRUC, se dispone de una cámara de radón cúbica de acero inoxidable de 1 m^3 cuyas paredes están soldadas entre si (ver figura 7). En su interior se pueden introducir los diferentes equipos de medida de concentración de radón. El acceso a la cámara se realiza retirando la tapa superior de la cámara [18].

La tapa superior tiene 3 agujeros circulares de 80 mm de diámetro a través de los cuales se pueden realizar pequeñas modificaciones en el interior sin alterar de manera significativa la concentración de radón. Por estos agujeros se se pueden extraer o incorporar fuentes y detectores de radón o comprobar el funcionamiento de los mismos funcionamiento.

Para poder elegir la posición de los detectores en el interior se dispone de un sistema de guías que permiten ajustar la altura dentro de un rango junto a unas baldas gracias a las cuales se podría colocar un detector en prácticamente cualquier posición como se aprecia en la figura 7.

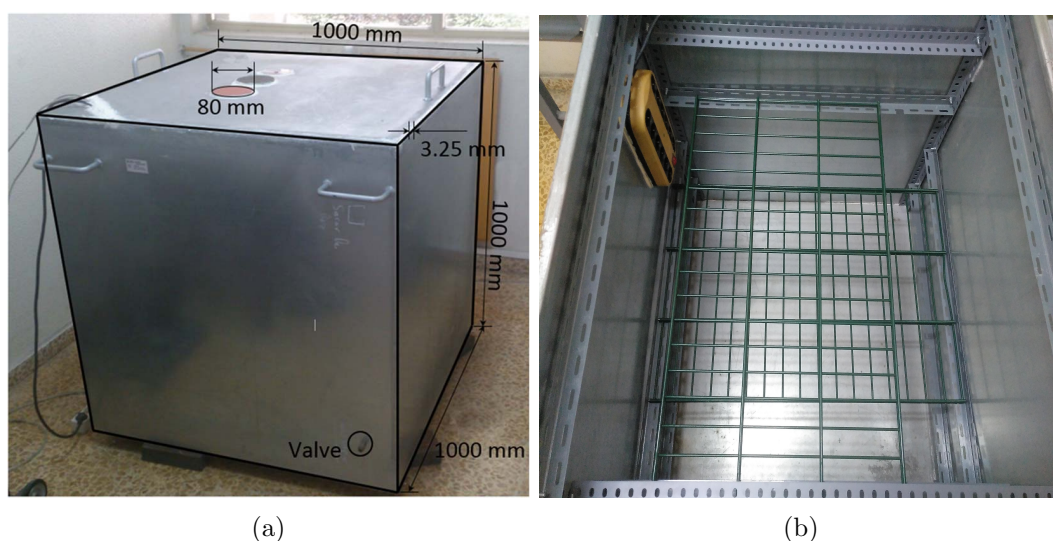


Figura 7: a: se observa el exterior de la cámara cerrada con sus dimensiones, los orificios superiores de acceso y la válvula que permite conectar una bomba para extraer aire del interior de la cámara [18]. b: se distingue el sistema de estanterías para poder situar los detectores de radón en la posición deseada y una serie de conexiones a la red eléctrica.

Con el fin de homogeneizar la concentración de radón en el interior se utiliza un ventilador que distribuye el aire por el interior de la cámara. Dado que este dispositivo y algunos detectores necesitan estar conectados a una corriente eléctrica, y además estos últimos pueden conectarse a un ordenador, también hay hueco para que los cables puedan salir al exterior. El cierre de la cámara se realiza usando masilla acrílica para que la tapa quede bien sellada al cuerpo de la cámara y no haya intercambios de aire entre la atmósfera interior y la exterior.

Para tener un control continuo de la concentración el monitor de referencia puede conectarse a un ordenador en el exterior de manera que se puede conocer la concentración en cada

instante.

Un esquema del funcionamiento general de la cámara aparece en la figura 8

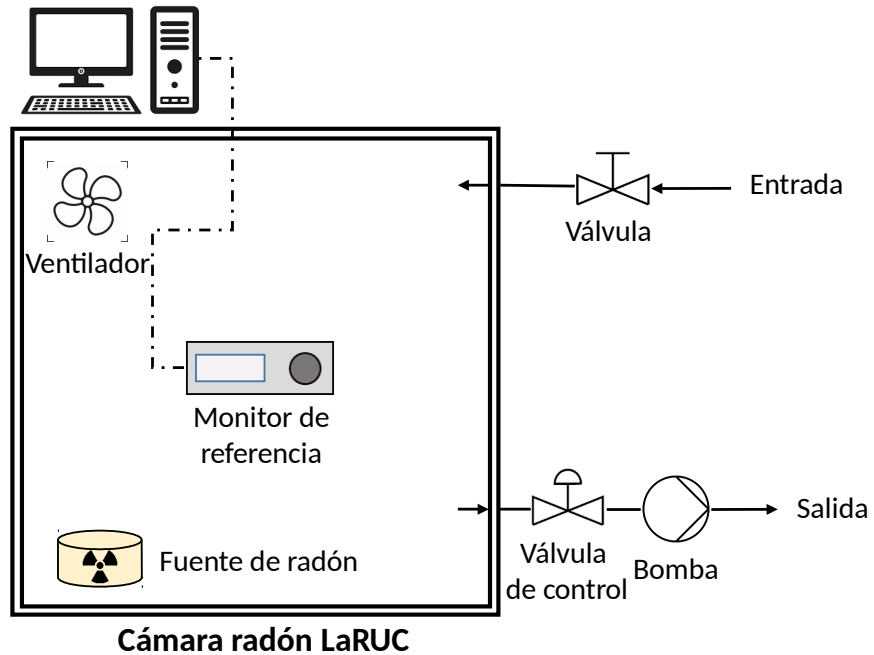


Figura 8: Esquema con los elementos de la cámara. Se dispone de un ordenador en el exterior conectado al monitor de referencia, una fuente de radón que se podría extraer si fuera necesario, un ventilador y dos válvulas, una de entrada y otra de salida de aire conectada a una bomba.

El único intercambio de aire con el exterior se hace a través de la válvula que permite variar la concentración de radón en el interior de manera controlada. Para que este intercambio sea controlado, se utiliza una bomba que extraerá el aire con un cierto flujo. Para evitar que se produzca el vacío en el interior existe otra válvula para permitir la entrada de aire del exterior

Para diluir la concentración en el interior se dispone de distintas bombas que permiten variar su flujo desde 0,03 hasta 35 l/min.

En particular se ha utilizado la bomba AlphaPUMP de la casa Saphymo. Esta bomba permite ajustar el flujo en tres valores: 0,3, 0,5 y 1 l/min. Estos valores de flujo se pueden duplicar dado que puede funcionar a una décima parte de los mismos utilizando un modo de funcionamiento que hace que esté activa durante 2 segundos y luego parando 18 segundos. Su diseño hace que en el interior de la misma no haya fugas de radón de manera que el radón que entra a la bomba es el mismo que sale.

Se ha utilizado también la bomba Model DF-AB40L-Li de la casa F&J. Es una bomba portátil que tiene un rango de funcionamiento comprendido entre 10 y 35 l/min. Consta de un caudalímetro digital de precisión calibrado para ajustar el flujo de funcionamiento de la bomba. El flujo se ajusta de forma continua con un error máximo del 4 %.

2.2. Fuentes de radón

Una fuente de radón es un dispositivo que contiene una determinada actividad de radio, el cual, al desintegrarse se convierte en radón y la fuente permite la emanación del mismo al exterior.

Se va a emplear una fuente calibrada, la Pylon Model RN-1025. Esta fuente está formada un contenedor seco con ^{226}Ra de cristal y plástico, que facilita que todo el radón que se produzca salga al exterior . El diseño permite que la emanación no se vea afectada por variaciones de presión o temperatura, a excepción de que se produzca condensación en su interior. Todo el conjunto está protegido por una carcasa cilíndrica de aluminio con dos válvulas a a cada extremo [19]. La fuente utilizada aparece en la figura 9.

Según la documentación de calibración la fuente tenía a fecha 28 de febrero del 2003 una actividad de $20,85 \pm 0,83$ kBq. Usando la ecuación (1) se obtiene que la actividad actual (a fecha 8 de abril de 2019, fecha media de la realización de este trabajo) es $20,71 \pm 0,82$ kBq. Debido a que el radio tiene un tiempo de vida largo, la actividad de la fuente no varía de forma apreciable. Gracias a esto, se pueden usar datos antiguos de la emanación de la fuente, debido a que este valor apenas habrá variado. El valor de la emanación será por tanto $\phi = (149 \pm 3)$ Bq/h.



Figura 9: Fuente de radón utilizada en el experimento [19].

El diseño de la fuente está pensado para que se introduzca un flujo de aire por una de las válvulas y el aire al fluir se mezcle con el radón de forma que la emanación se controle con el flujo. Al mismo tiempo, si se emplea un deshumidificador a la entrada de la válvula se puede evitar la condensación en el interior de la misma.

Es posible prescindir de utilizar un flujo y simplemente dejar abiertas ambas válvulas para que el radón salga al exterior mediante difusión. La fuente se ha colocado en el fondo de la cámara de radón, frente al ventilador, con ambas válvulas abiertas.

También se ha empleado una fuente hecha en el propio laboratorio. Esta fuente está construida a partir de tierras que tienen una alta concentración de radio. En este caso particular con tierra traída de la mina de uranio de Saelices el Chico(provincia de Salamanca, España). Esta tierra se seca y pulveriza para facilitar la salida del radón del interior. Finalmente se almacena en un bote de un material en el que el radón tenga una alta difusión como puede ser el plástico y se puede utilizar como fuente de radón del mismo modo que la otra. Esta fuente se la denomina Rn1 con $\phi = 254 \pm 4$ Bq/m³.

2.3. Control de la concentración de radón

La variación temporal de la concentración de gas radón en el interior de la cámara se rige por una ecuación diferencial ordinaria de primer orden [18].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\phi}{V} - \lambda C \quad (3)$$

donde C es la concentración de gas radón expresada en Bq/m³, t el tiempo en horas, ϕ será la producción de la fuente en Bq/h, V el volumen de la cámara en m³ y λ la constante de desintegración en h⁻¹.

Dado que se puede emplear un flujo para extraer aire del interior de la cámara, λ no va a coincidir necesariamente con la del radón. Por ello habrá que tener en cuenta otro parámetro, λ_e , que será la variación de radón atribuible al flujo de aire. Esta variación se calculará como sigue:

$$\lambda_e = \frac{60 f}{1000 V} \quad (4)$$

siendo f el flujo medido en litros/minuto. De esta manera se define como $\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_e$ con $\lambda_{Rn} = 0,0075575 \text{ h}^{-1}$.

Además en el caso de haber pérdidas de radón en la cámara deberá tenerse en cuenta otro parámetro, $\lambda_{\text{perdidas}}$ que servirá para cuantificar el ritmo al que disminuye la concentración de radón. Así $\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_e + \lambda_{\text{perdidas}}$.

La resolución de la ecuación (3) tiene por resultado:

$$C(t) = C(0) e^{-\lambda t} + \frac{\phi}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

donde $C(0)$ será la concentración inicial, también en Bq/m³.

Cuando $t \rightarrow \infty$, la concentración en el interior de la cámara de radón se encontrará en el equilibrio. Resolviendo (5) con esta condición se obtiene el valor de concentración máxima alcanzable de manera teórica.

$$C_{\max} = \frac{\phi}{\lambda V} \quad (6)$$

En la figura 10 se representa la variación de la concentración con el tiempo para distintos valores de f .

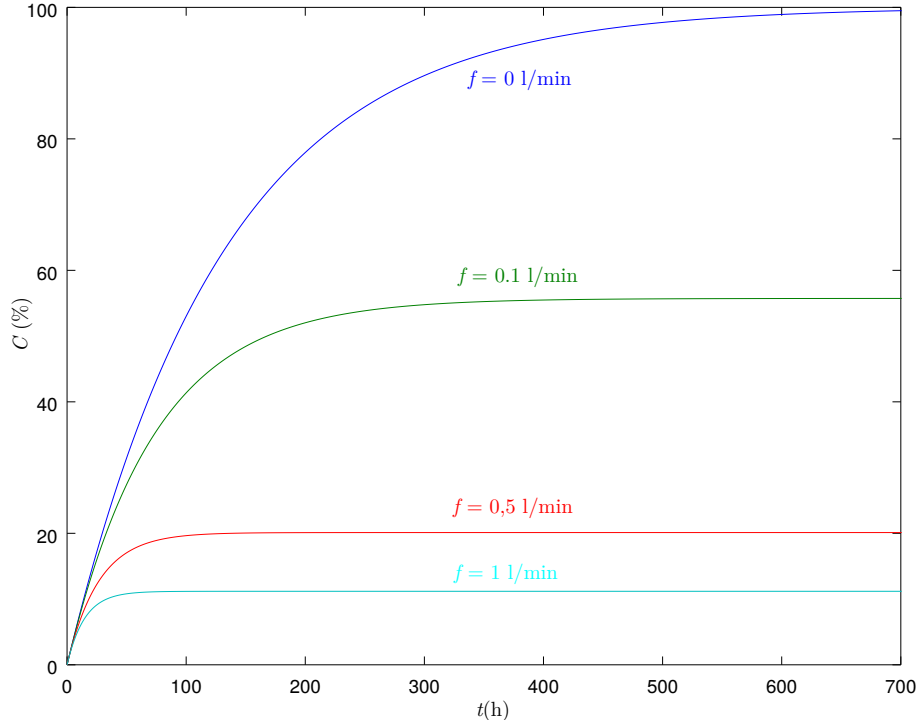


Figura 10: Figura que representa el comportamiento de la ecuación (5). Los parámetros son arbitrarios salvo $\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_e$. El 100 % de la concentración es el valor teórico de saturación calculado por la ecuación (6). Se observa que hay grandes diferencias entre usar o no utilizar una bomba para extraer el aire.

Si se establece como criterio que la concentración ha alcanzado el máximo al llegar al 99,3 % del valor de C_{\max} se necesitarían 658 h (aproximadamente 27 días) para alcanzar este valor.

En cambio, si se utiliza una bomba a un flujo de 0.1, 0, 5 y 1 l/min, como se ve en la figura 10, en un tiempo de 367, 134 y 75 horas respectivamente se habrá alcanzado el valor C_{\max} . De esta manera queda patente la utilidad del uso de la bomba. El inconveniente principal es que la concentración será aproximadamente un orden de magnitud inferior.

Para poder realizar un tratamiento estadístico a las medidas de concentración de radón es necesario que el valor de la concentración sea el mismo. Es decir, cuando se mida concentración se tomará una serie de medidas dentro de una región donde la concentración sea constante a lo largo del tiempo.

De forma general, y para evitar tiempos de medida muy largos, se puede introducir una (o varias) fuentes sin un flujo activo. De esta manera el crecimiento durante las primeras horas es muy rápido como se observa en la figura 10 para $f = 0$ l/min. Una vez que se alcanza la concentración deseada o se está cerca de ella, se puede conectar la bomba para estabilizar en el valor deseado.

2.4. Monitores de radón

Un monitor de radón es un dispositivo de medida de la radiación, con el propósito principal de identificar la concentración de este gas en distintos medios tales como atmósferas, aguas

o suelos. Para ello se detecta de manera directa la desintegración del radón o de sus descendientes o utiliza ambas fuentes de información a la vez. Estos monitores realizan un conteo de las desintegraciones a lo largo de un tiempo y esas cuentas son extrapoladas a una concentración a partir de un cociente que es distinto para cada monitor.

El LaRUC se dispone de diferentes monitores de radón, cada cual con una técnica diferente de detección. Los que se han utilizado para la realización de este trabajo son los siguientes:

AlphaGUARD

Es un monitor ideado para realizar medidas de precisión, como por ejemplo medidas de calibración dentro de una cámara de radón. Es uno de los monitores de referencia del laboratorio debido a que es trazable al patrón primario de radón del PTB. Está calibrado directamente en el laboratorio Saphymo comparándose con otro AlphaGUARD patrón.

Esta fabricado por la casa Bertin Instruments y además proporciona información de la temperatura, la presión y la humedad del ambiente a través de diversas sondas que hay en su interior.

El método de detección está basado en una cámara de ionización pulsada de 0.56 litros donde se realizan las medidas [20]. Cuando un átomo de radón se desintegra, la partícula α emitida deja un rastro en su interior debido a que ioniza los átomos de aire con los que se encuentra. Estos iones tienen una vida media lo suficientemente larga como para ser transportados a un ánodo y ser detectados. De manera aproximada la partícula α de 5,5 MeV produce $1,57 \times 10^5$ ionizaciones. A mas energía mas ionizaciones se producirán por lo que puede realizarse espectrometría α y conocer si es el radón o sus descendientes quienes producen cada ionización.

Esto permite que el microprocesador del monitor conozca directamente el valor de la concentración (por lo que la detección de las variaciones en la misma es rápida) y seguido corrija la medida a partir de las lecturas del decaimiento de los descendientes.

Funciona en un rango de concentraciones que va desde 2 Bq/m³ hasta 2 MBq/m³, a si mismo tiene una sensibilidad de 300 cph (cuentas por hora) a una concentración de 100Bq/m³.

Para recabar las medidas se va a utilizar la difusión , permitiendo la entrada de aire al interior y que la cámara de ionización se equilibre con el exterior debido a la diferencia entre concentraciones. Se tomarán medidas cada hora debido a que es el intervalo de tiempo de los otros monitores.

Radon Scout

Es un monitor pensado para realizar medidas de concentración de radón en lugares como cuevas, lugares de trabajo o viviendas. Debido a ello es un monitor portátil y de tamaño reducido.

Para la detección emplea un detector de silicio que permite realizar espectrometría alfa. Cuando un átomo de radón se desintegra, la partícula α ioniza el átomo a causa de un

efecto de scattering [21]. El átomo de ^{218}Po resultado de la desintegración estará ionizado y gracias a la presencia de un campo eléctrico se realiza una electrodeposición en el detector, al cual quedará adherido.

Los descendientes del radón que quedan adheridos también se desintegrarán. Debido a que la energía de la partícula α es característica de cada isótopo, la energía detectada por el detector se resuelve mediante un microprocesador que asigna a que elemento pertenece esa energía, obteniéndose así la concentración. Dentro de la cadena están el ^{214}Bi y ^{214}Pb que decaen vía β por lo que no serán detectados.

El primer elemento detectado, ^{218}Po , entra en equilibrio con la concentración de radón en unos 20 minutos ($5 T_{1/2}$) pero el ^{214}Po requiere de algo mas de 3 horas. Ver figura 2.

De esta manera el dispositivo es capaz de relacionar el número de desintegraciones que se han producido en cada espectro con la concentración que en la que está inmerso [22]. Se puede usar un modo rápido que solo tiene en cuenta el primer descendiente o uno mas lento que aporta mayor exactitud a la medida pero un retraso a la hora de tomarla. Se ha optado por el método rápido.

Es un monitor rectangular protegido por una carcasa metálica en la que a través de sus hendiduras el radón se difunde entrando a su interior. Este fenómeno sumado al tiempo de equilibrio de la concentración causa que si hay variaciones rápidas de la concentración exterior el detector tendrá un tiempo de retraso.

Su rango de funcionamiento alcanza hasta 10 MBq m^{-3} . con una sensibilidad de 10,8 cph a 100 Bq m^{-3} . Realizando medidas de una hora el error es del 20 % a 200 Bq m^{-3} y menor del 10 a 1000 Bq m^{-3} [23].

También dispone de termómetro, barómetro e higrómetro.

AlphaE

Es un instrumento de Bertin Instruments, está pensado como un monitor portátil de larga autonomía (mas de 6 meses). Utiliza una batería recargable por USB como fuente de alimentación. También incorpora una pantalla para ver la concentración medida en tiempo real.

Para medir la concentración de radón utiliza un diodo de silicio para detectar las emisiones α de los descendientes del mismo. En su interior el aire del medio entra gracias a la difusión. Su rango de medidas va desde los 20 Bq/m^3 hasta 10 MBq/m^3 , pero con una sensibilidad mucho menor que los otros monitores, de 3 cph a una concentración de 100 Bq/m^3 .

También incorpora instrumentos para detectar temperatura, humedad y presión, así como realiza una estimación de la dosis recibida a partir de esa exposición.

Se presenta la tabla 1 que compara las características mas importantes de los distintos monitores de cara a la medición de la concentración.

Tabla 1: Sensibilidad de los monitores de radón utilizados e incertidumbre nominal medida durante una hora. El valor de la incertidumbre decrece si aumenta la concentración.

Monitor	Sensibilidad (cph/1000 Bq m ⁻³)	Incertidumbre (1000 Bq m ⁻³)
AlphaGUARD	3000	< 3 %
Radon Scout	108	< 10 %
AlphaE	30	< 30 %

Al medir una concentración de radón, los descendientes quedarán adheridos a los detectores o en el interior de la cámara de ionización y seguirán siendo átomos inestables que se desintegrarán con el paso del tiempo. Si su desintegración es α y la energía de la partícula tiene un valor próximo a la de otro elemento, al menos lo suficiente como para que el detector no pueda distinguir a cual de ellos pertenece, el monitor contará mas desintegraciones de las que son causadas por las desintegraciones atribuibles al radón presente en ese recinto.

Este fenómeno es fruto de una contaminación que sufren los monitores y que es directamente proporcional a la exposición que han sufrido. Debido a esto, cuando la concentración de radón sea cero, el monitor de radón detectará cuentas y la concentración indicada por el monitor será distinta de cero.

Tabla 2: Energía de las α de los elementos que mas importancia tienen para calcular la concentración de radón [24].

Elemento	Q (kev)
²²² Rn	5489
²¹⁸ Po	6002
²¹⁴ Po	7687
²¹⁰ Po	5304

Los elementos de la tabla 2 son los emisores α que se van acumulando en los detectores a medida que se exponen a radón. Cuando estos elementos comienza a desintegrarse, si la energía de uno es cercana a la de otro provoca que se detecten mas cuentas de las que puede asociarse directamente a la concentración atmosférica de radón en el momento de la medida. Además, tal y como muestra la figura 1, el ²¹⁰Po depende del decaimiento previo del ²¹⁰Pb cuyo periodo de semidesintegración es de 22,2 años por lo que este elemento estará mucho desintegrándose lentamente.

Dado que esa desintegración ocurre de manera continuada, se puede y se debe realizar una medida del fondo intrínseco de cada monitor para corregir las futuras medidas.

2.5. Medida del fondo

Como se ha explicado los monitores de radón tienen un fondo asociado debido a la contaminación de los mismos. Esta contribución será constante independientemente de la concentración medida. Si se realizan medidas precisas, es decir, con poca concentración atmosférica de radón, el fondo puede ser una contribución importante a la medida.

Para evaluar el fondo de cada monitor se utilizó la cámara de radón emplazando todos los monitores disponibles en su interior sin ninguna fuente de radón en el interior de la cámara. Se cerró asegurando el sellado y los detectores permanecieron en su interior durante unas 100 horas.

Para minimizar la presencia de radón de origen natural en el interior de la cámara, esta se ventiló previamente con aire del exterior por lo que $C < 10 \text{ Bq/m}^3$ [25].

Debido a que los monitores se contaminan con el uso, este procedimiento debe repetirse de manera periódica ya que el fondo habrá variado. Además si algún monitor tiene una contaminación elevada e influirá de forma significativa en las medidas que se van a realizar, podría descartarse su utilización de antemano.

La media de las medidas del fondo se denotará como C_{0i} para cada uno de los monitores que se van a utilizar. Para la incertidumbre de este resultado se tomará la desviación estándar de las medidas del fondo [26].

2.6. Evaluación de la estanqueidad de la cámara de radón

Una de las características necesarias que debe cumplir una cámara de radón es que el intercambio de aire entre el interior de la cámara y el exterior sea mínimo.

La comprobación de cuanta cantidad de gas radón se pierde se realizará a través de la determinación experimental del parámetro λ . Dado que si este valor es mayor que el teórico será por que existe un mecanismo no controlado por el que se pierde radón.

El procedimiento por el cual la estimación del parámetro λ tiene menor fuente error es aquel que mide el decaimiento radiactivo del gas radón dentro de la cámara de manera directa.

De esta manera en la ecuación (5) $\phi = 0$ por lo que:

$$C(t) = C(0) e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Es decir, se reduce a la ley de desintegración radiactiva.

Para determinar la ecuación (7) se introdujo el monitor AlphaGUARD en el interior de la cámara, con el ventilador encendido. Se selló la tapa superior para minimizar las pérdidas y a través de una de las tapas superiores se introdujo la fuente Rn1.

No se empleó ninguna bomba por lo que $f = 0 \Rightarrow \lambda_e = 0$. Dado que a mayor concentración la incertidumbre de las medidas disminuye, se esperó a que la concentración fuera superior a 10 kBq/m^3 .

Al superar esta concentración, se extrajo la fuente de radón y se selló la abertura de la cámara. Las medidas registradas desde este momento se utilizaron para calcular el parámetro λ . Se realizaron medidas en intervalos de una hora durante aproximadamente dos periodos de semidesintegración, es decir un tiempo de unos 7 días.

El valor de λ que se obtenga deberá ser comparado con el valor teórico λ_{Rn} . En el caso de que $\lambda > \lambda_{Rn}$ existirán unas pérdidas cuantificables por el parámetro $\lambda_{pérdidas}$.

2.6.1. Técnica para la estimación de λ

Se obtuvieron alrededor de 170 datos experimentales para el cálculo de λ . En las medidas de desintegración, los resultados son compatibles con una distribución Poissoniana por lo que el error del parámetro se calculó mediante una simulación de medida suponiendo que los resultados provienen de esta distribución particular.

Si en la ecuación (7) se toman logaritmos se obtendrá que:

$$\ln C(t) = \ln C_0 - \lambda t$$

De esta manera la pendiente de la recta que ajuste es igual a λ y la ordenada en el origen es igual al logaritmo neperiano de la concentración inicial. Se hizo variar cuantitativamente a cada uno de los resultados de la serie de medidas una cantidad compatible con una distribución de Poisson. Es decir, se calcula el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con unos datos diferentes que son compatibles con la distribución estadística de la cual provienen.

Esta simulación se repitió N veces, y se obtuvieron por tanto N resultados diferentes tanto para λ como para C_0 . Para calcular el resultado de cada uno de los parámetros se hizo la media aritmética de todas las simulaciones y se tomó como valor para la incertidumbre el valor de la desviación estándar entre la raíz del número de medidas.

El valor de N utilizado es de 100 000 iteraciones.

2.7. Homogeneidad

La medida de la homogeneidad se realiza en dos etapas, una de calibración y otra que será la medida en si misma [27].

2.7.1. Cálculo factor calibración

El factor de calibración es un valor que relaciona un monitor con otro de referencia. Una vez obtenido el valor se utiliza para ajustar una media hecha con ese monitor al valor trazable. Además debe tenerse en cuenta que pese a ser un valor bastante estable puede sufrir variaciones dependiendo del nivel de concentración, por lo que conviene calcular dicho factor a un nivel cercano del que se va a medir después en la medida de lo posible.

Al ser el LaRUC un laboratorio acreditado se realizan controles periódicos de los factores de calibración de estos monitores. Para ello se emplean dos monitores que sean trazables al patrón y el monitor que se quiere caracterizar.

Dentro de la cámara se sitúa el monitor del que se quiere calcular el factor entre los dos de referencia a fin de poder asegurar que la incertidumbre debida a las posibles inhomogeneidades sea mínima al encontrarse en la misma zona y además ser capaces de cuantificarla debido a la diferencia del resultado de los dos monitores calibrados.

Para realizar las medidas se debe introducir una fuente de radón y estabilizar el valor de la concentración de radón en un valor. Dado que hay fluctuaciones estadísticas características de la medición de radiactividad, la concentración debe ser mantenida durante un cierto periodo de tiempo para que se puedan tomar suficientes medias a fin de disminuir la incertidumbre.

Cada monitor registrará un valor diferente para la concentración media, pese a que se trate de la misma medida. A este valor se le llamará C'_i . A cada uno de ellos se le sustraerá el fondo para hacer los cálculos de forma correcta.

El AlphaGUARD utilizado a su vez está calibrado respecto al laboratorio Saphymo. El último resultado del factor de calibración es $F_{AG} = (1,005 \pm 0,024)$ con $K=1$. Así mismo como valor de fondo se utiliza la desviación estándar de una serie de medidas del fondo [26]. Mientras que para el error de la media de medidas se utiliza la desviación estándar entre la raíz del número de medidas [28].

$$F_i = \frac{(C_{\text{ref}} - C_0)F_{\text{ref}}}{C_i - C_{0i}} \quad (8)$$

Esta ecuación sirve para calcular el factor para cada monitor. Siendo F_i el factor de calibración del monitor i -ésimo, C_{ref} como el valor medido por el monitor de referencia y C_0 su fondo. Por otro lado C_i y C_{0i} son la concentración medida por el monitor a calibrar y su fondo, respectivamente. Es necesario también realizar un cálculo preciso de los errores.

Como habrá una pequeña diferencia en la medida de la concentración entre los dos monitores calibrados que se empleen, es necesario introducir un factor de error que considere la homogeneidad en la propagación de la incertidumbre de la medida. Este valor será ξ expresado como la diferencia relativa entre las dos medidas trazables.

$$\frac{u(F_i)}{F_i} = \sqrt{\frac{u(C_{\text{ref}})^2 + u(C_0)^2}{(C_{\text{ref}} - C_0)^2} + \frac{u(C_i)^2 + u(C_{0i})^2}{(C_i - C_{0i})^2} + \left(\frac{u(F_{\text{ref}})}{F_{\text{ref}}}\right)^2 + \xi^2} \quad (9)$$

Los factores de calibración disponibles de los monitores se presentan en la tabla 7.

Tabla 3: Factores de calibración con sus incertidumbres para los distintos monitores empleados en el trabajo.

Monitor	F
AlphaGUARD	$1,005 \pm 0,024$
RS175	$1,072 \pm 0,036$
RS176	$0,908 \pm 0,025$
RS456	$0,960 \pm 0,029$
RS1133	$0,949 \pm 0,027$
RS1148	$0,831 \pm 0,024$
RS1503	$0,886 \pm 0,025$
RS1504	$1,051 \pm 0,031$
RS1506	$0,987 \pm 0,028$
RS1507	$0,927 \pm 0,025$

2.7.2. Medida

Para realizar la medida de la homogeneidad se colocaron diversos detectores en diferentes lugares de la cámara, formando una geometría tridimensional como la que aparece en la figura 11c. Debido a que el AlphaGUARD es el monitor mas preciso se colocó en el centro. La zona escogida es la zona central que es aquella en la que se efectúan todas las comparaciones destinadas a comparar equipos para su posterior calibración. Por tanto esta zona es la que mas interés tiene en ser caracterizada.

Del mismo modo, los Radon Scout tienen una mayor dispersión a la hora de medir por lo que fueron colocados en lugares mas extremos dado que es donde se esperaba que las diferencias de concentración (si las hubiera) fueran mas grandes y esos dispositivos serían capaces de distinguirla.

Las posiciones elegidas se presentan en la tabla 4 y en la figura 11 se representa como se situaron los monitores en la cámara.

Tabla 4: Posición de los monitores dentro de la cámara de radón para realizar la medida de la homogeneidad.

Detector	x (cm)	y (cm)	z (cm)
RS456	25	50	20
RS175	75	50	20
RS1503	50	75	40
RS1504	50	25	40
AlphaGUARD	50	50	40
RS1506	20	50	60
RS1507	50	50	60
RS1133	80	50	60
RS1148	50	75	80
RS176	50	25	80

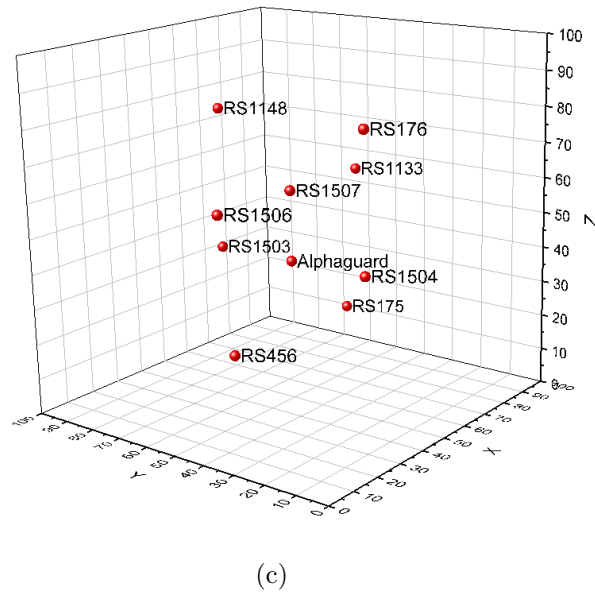


Figura 11: Posiciones de los monitores en la cámara de radón.

Para realizar las medidas la cámara se cerró con los monitores en su interior, con el ventilador conectado y se selló la tapa superior. El valor de concentración al que se estabilizó la cámara de radón fue próximo a la que fueron realizados los cálculos del factor de calibración. Es decir, en torno a 2000 Bq/m^3 . Se mantuvo la estabilidad durante dos días para tener suficientes medidas.

Para la estabilidad se utilizó la fuente Pylon Model RN-1025 en el fondo de la cámara y un flujo de aire $f = 11/\text{min}$ producido con la bomba AlphaPump.

2.7.3. Corrección de la medida

Se va a denominar C_i^* a la medida bruta realizada por el monitor i -ésimo y C'_i a la medida con su fondo sustraído, es decir:

$$C'_i = C_i^* - C_{0i} \quad (10)$$

Y finalmente C_i será la medida corregida, aquella trazable al patrón de referencia. Este último valor se calculará como:

$$C_i = C'_i * F_i \quad (11)$$

Para proporcionar un valor real deberá realizarse la propagación de errores teniendo en cuenta todas las fuentes de incertidumbre.

$$\frac{u(C_i)}{C_i} = \sqrt{\frac{u(C_i^*)^2 + u(C_{0i})^2}{C_i'^2} + \left(\frac{u(F)}{F}\right)^2} \quad (12)$$

Siguiendo este procedimiento se se obtendrán unos factores de calibración con un error asociado que servirán para corregir las medidas de radón de cada monitor y se podrá calcular el valor real de la medida. Además este valor será trazable al patrón de radón.

2.8. Modelo matemático para la homogeneidad

Para evaluar la homogeneidad de la cámara de radón se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Para realizar este test, las medidas deben provenir de una distribución normal, por lo que se hizo un test de normalidad previamente.

Las medidas utilizadas en los test están corregidas, tanto su fondo como el factor y por ello son trazables al patrón.

2.8.1. Test de normalidad

Las medidas de radiactividad se pueden parametrizar haciendo uso de una distribución de Lorenzt. Como particularidad de esta distribución, cuando el número de medidas $N \rightarrow \infty$, se transforma en una distribución normal. En radiactividad, se suele aceptar 30 como el número de medidas mínimo para que se pueda considerar que una serie de medidas proviene de una distribución normal.

Para no depender de este criterio se va a realizar un test de normalidad a las medidas. Este test es el Kolmogorov-Smirnov de una muestra [29].

Este test estadístico supone que los datos que provienen de una serie de observaciones independientes (x_i) forman parte de una distribución de medidas que provienen de una función normal $F_n(x)$.

La hipótesis planteada será:

$H_0 : F(x_i) = F_n(x_i)$ Para todos los valores de x

$H_1 : F(x_i) \neq F_n(x_i)$ Si no se cumple para al menos un elemento.

Es decir, se considera que $F_n(x_i)$ serían los datos prominentes de una distribución normal de un conjunto X y se la compara con la distribución experimental obtenida $F(x_i)$.

Los valores x_i se ordenan de menor a mayor y se comparan uno a uno con el modelo teórico.

$D = \sup_x |F(x) - F_n(x)|$. D será el supremo de todos los valores de x del conjunto de diferencias entre $F(x)$ y $F_n(x)$. Es decir, si se representan gráficamente las distancias D será la mayor distancia entre $F(x)$ y $F_n(x)$.

La hipótesis H_0 se rechazará a un nivel de significancia α si D es mayor que el valor de $1-\alpha$ de la tabla de cuantiles de Kolmogorov [30].

2.8.2. Test de homogeneidad

En el caso de que no se rechace la hipótesis de que las medidas no provienen de una distribución normal, se puede hacer otro test de hipótesis donde se pruebe si las medidas de los distintos monitores provienen de la misma distribución [31].

Se va a suponer que se tienen I monitores midiendo con N medidas en cada uno donde C_{ij} se referirá a la medida j -ésima del monitor i -ésimo.

Cada valor de concentración C_{ij} será el valor de la medida de todas las medidas de todos los monitores, es decir la medida global μ sumado a la desviación entre la media de ese monitor respecto a la media global, $\alpha_i = \mu_i - \mu$ y finalmente sumándole una variación aleatoria para esa medida j en particular. Por lo tanto cada medida quedará descompuesta de la siguiente manera:

$$C_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$$

Se define de aquí una función de pronóstico:

$$C_i = \mu + \alpha_i$$

que operando a ambos lados con la media de la variable dependiente \bar{C}

$$C_{ij} - \bar{y} = C_i + e_{ij} - \bar{y}$$

Esto se suele ver en la literatura como:

$$SS_{\text{total}} = SS_{\text{poblacion}} + SS_{\text{error}}$$

Para el cálculo de ANOVA es necesario obtener el error cuadrático medio (MS) tanto para las poblaciones (A) como para el error (E) que será la suma cuadrática entre los grados de libertad. $MS = \frac{SS}{df}$

$$MS(A) = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

$$\hat{\sigma}^2 = MS(E) = \frac{1}{N-I} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

Finalmente se calcula el factor F para verificar si se cumple la hipótesis nula $F = \frac{MS(A)}{MS(E)}$. Este valor de F debe compararse con el valor teórico que viene en función del nivel de significancia α y del número de grados de libertad del total de distribuciones como dentro de cada una.

$H_0 : F(x) < F_{\alpha}(I-1, N(I-1))$ No se puede rechazar la homogeneidad.

$H_1 : F(x) > F_{\alpha}(I-1, N(I-1))$ Se rechaza la homogeneidad.

2.9. Calibración de un monitor

Finalmente, se va a proceder a la calibración de un monitor de radón incluyendo en los cálculos la incertidumbre proveniente de la homogeneidad de la cámara en si. En concreto se va a calibrar el AlphaE respecto al AlphaGUARD. Para ello se va a estabilizar la cámara a tres concentraciones distintas. De esta manera se podrá conocer el factor de calibración para cada una de ellas.

Se escogerá en primer lugar una fuente de radón y tres valores para el flujo de la bomba extractora. De esta manera se va a estabilizar a 6000, 2000 y 400 Bq/m³. Se situará el Alpha E dentro de la región de homogeneidad en la que se han realizado las medidas anteriores y se conoce el valor de la misma.

El procedimiento consistirá en sellar la cámara con la fuente Pylon Model RN-1025 en su interior y los monitores, sellar la cámara y utilizar un flujo de los elegidos hasta que la concentración estabilice. Una vez se hayan tomado suficientes medidas con esa concentración estable se cambiará el flujo para medir a otra concentración, y así hasta medir las 3 concentraciones diferentes.

A la hora de calibrar el dispositivo se deberá tener en cuenta el procedimiento para calcular los factores de calibración explicados en el apartado 2.7.1 de este trabajo. A si mismo, a la hora de calcular el error habrá que añadir a las cuentas un factor relativo mas que tenga en cuenta la homogeneidad de la propia cámara.

Para el cálculo de los factores de calibración a cada nivel de concentración se va a utilizar la ecuación (8) y para el cálculo del error de la misma se usará (9) la diferencia ahora es que el valor de ξ introducido para tener en cuenta el error de la incertidumbre de la homogeneidad será el calculado para la cámara al medir la homogeneidad.

Una vez este equipo esté calibrado, cuando se utilice para hacer medidas, se obtendrá un valor trazable. Al mismo tiempo su incertidumbre incluirá la incertidumbre de la propia medida y del fondo del equipo, así como la incertidumbre del equipo con el que se comparó que lleva asociada la de todos los procesos de comparación anteriores y la propia incertidumbre en la homogeneidad de la cámara de radón donde se calibró.

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados experimentales siguiendo los métodos descritos en el apartado 2. Todas las incertidumbres mostrados tienen un intervalo de confianza $K = 1$, salvo que se exprese lo contrario, y su cálculo se ha hecho siguiendo las directrices de la guía para la expresión de la incertidumbre del Centro Español de Metrología [28].

3.1. Fondos

Los monitores de radón fueron introducidos en la cámara sin ninguna fuente para evaluar el fondo intrínseco de los mismos. Se realizaron unas 100 medidas de los monitores disponibles en el laboratorio en el momento de la medición.

Se presentan en la tabla 5 los valores medidos de los fondos de cada monitor utilizado.

Tabla 5: Fondo de los detectores de radón disponibles con su desviación estándar. Las condiciones ambientales de la cámara fueron las siguientes. $T = (17,6 \pm 1,1) ^\circ\text{C}$, $P = (1010 \pm 17) \text{ mbar}$ y $H = (52,2 \pm 2,1) \%$.

Referencia	Valor medio (Bq/m ³)	Desviación estándar (Bq/m ³)
AlphaGUARD	3	5
RS175	167	43
RS176	26	18
RS456	65	27
RS1133	30	15
RS1148	155	33
RS1503	11	12
RS1504	50	24
RS1506	20	16
RS1507	15	14
AlphaE	279	95

Estos monitores son los escogidos para utilizarse en el experimento debido a que de todos aquellos que estaban disponibles para realizar las medidas eran los que menor contaminación tenían y por tanto introducirían menos error a las medidas que se realizaran.

3.2. Estanqueidad

Cuando la concentración en el interior de la cámara de radón estaba próxima a los $13\,000 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ se extrajo la fuente y se selló la cámara. Las condiciones de la cámara durante el proceso de medida fueron las siguientes. $T = (18,5 \pm 0,6) ^\circ\text{C}$, $P = (1019 \pm 6) \text{ mbar}$ y una humedad relativa $(49,8 \pm 1,2) \%$.

Los datos del decaimiento se presentan en la figura 12.

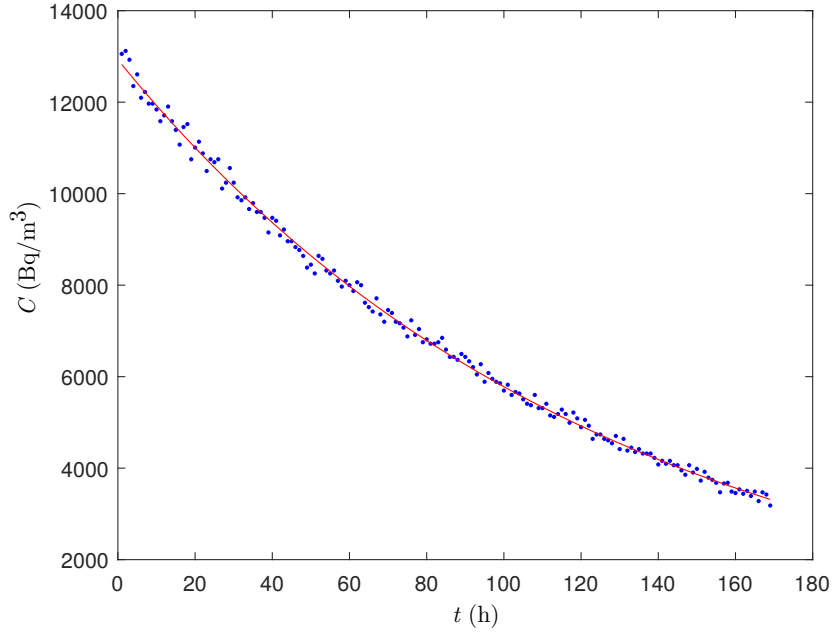


Figura 12: Representación de la concentración de radón en la cámara respecto al tiempo. Se ha ajustado a una recta exponencial tal y como la ecuación (7). Los parámetros que ajustan, siguiendo el método de simulación explicado en el apartado 2.6.1, para la siguiente ecuación (7), son $C(0) = (12707 \pm 22) \text{ Bq/m}^3$ y $\lambda = (0,008041 \pm 0,000022) \text{ h}^{-1}$.

Obtenido del ajuste a la curva de decaimiento del radón no es estadísticamente igual al valor teórico $\lambda_{\text{Rn}} = (0,0075575 \pm 0,0000004) \text{ h}^{-1}$, esto supone una discrepancia respecto al valor teórico del 6 %. Esta discrepancia es equivalente a tener un factor de pérdida de radón en la cámara de valor $\lambda_{\text{perdidas}} = (4,835 \pm 0,013) * 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ o lo que es lo mismo a tener una bomba de aire funcionando a razón de $(8,06 \pm 0,22) \text{ ml/min}$.

El método utilizado para calcular λ proporciona una incertidumbre pequeña, menor del 0,3 %, debido a que el número de medidas ha sido alto y al igual que las concentraciones, ambos factores reducen la incertidumbre. Además el equipo utilizado tiene muy poca oscilación debido a que se mide el radón de manera directa y se autocorrigie el valor de concentración al medir los descendientes.

La contribución de las pérdidas a la constante de decaimiento radiactivo, es bastante pequeña en la práctica. Por fijar un valor, el flujo mínimo de la bomba extractora es de $f = 30 \text{ ml/min}$, bastante mayor que el que correspondería a las pérdidas por lo que en el caso de utilizar una bomba para estabilizar antes la cámara esta contribución será mas importante.

Por ejemplo, para el caso de la homogeneidad, la bomba se fijó a 1 l/min pero funcionó a un valor $f = (0,9 \pm 0,1) \text{ l/min}$. Si lo comparamos con las pérdidas, que equivaldrían a un flujo de $(8,06 \pm 0,22) \text{ ml/min}$, está perfectamente contenido dentro de las fluctuaciones de la bomba. Por ello es un valor que no va a influir mucho en las medidas y que puede ser omitido cuando se utilice la bomba en la cámara. Tampoco es necesario emplearlo siempre debido a que la estabilidad se va a alcanzar se considere o no las pérdidas.

3.3. Calibración de los monitores

Se va a mostrar un ejemplo de una calibración realizada para uno de los monitores usados en la cámara de radón a fin de estimar el valor de ξ utilizado en para el cálculo de los factores de calibración.

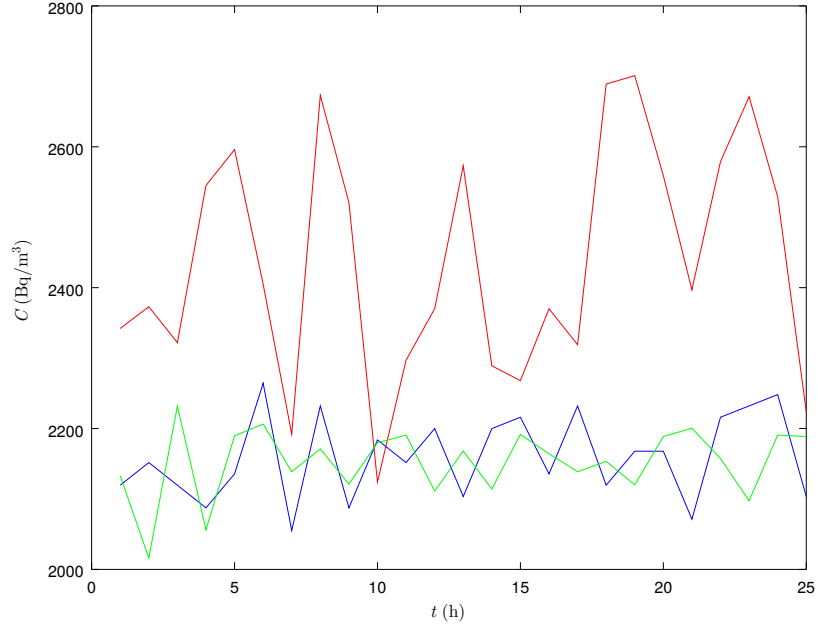


Figura 13: Concentración de la cámara para tres monitores. En rojo el Radon Scout 1503 y en verde el AlphaGUARD y en azul el ATMOS 12, otro monitor de referencia. Todas las medidas están corregidas y se presentan en la tabla 6.

Tabla 6: Concentración de radón registrada por cada monitor en el ejercicio de comparación. Los valores del AlphaGUARD y del ATMOS 12 han sido corregidos, tanto su fondo como por medio del factor de corrección.* En el caso de RS1503 solo se ha sustraído el fondo.

Monitor	$C \text{ (Bq/m}^3\text{)}$
AlphaGUARD	2160 ± 53
ATMOS12	2153 ± 48
RS1503*	2437 ± 35

Como se puede ver la diferencia entre las concentraciones medidas por los dos equipos de referencia es menor del 0,3 % por lo que se puede escoger este valor para ξ .

3.4. Resultados homogeneidad

Para esta cámara se situaron los monitores en la posición que indica la tabla 4 y tal y como se muestra en la figura 11

La fuente es la Pylon Model RN-1025 y el flujo de extracción de aire se fijó a 1 l/min.

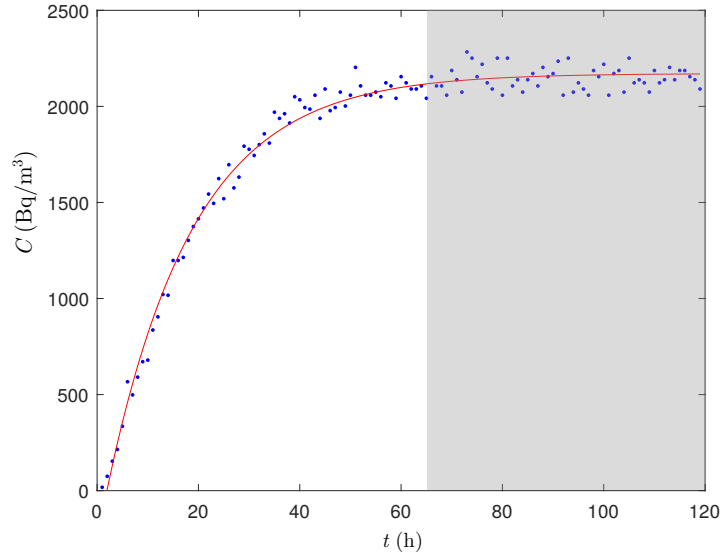


Figura 14: Gráfica de crecimiento de la concentración de radón dentro de la cámara medida con el AlphaGUARD con las medidas corregidas. La curva de ajuste es la ecuación (5) con los parámetros $C_0 = (-261 \pm 33) \text{ Bq/m}^3$, $\lambda = (0,05854 \pm 0,0014) \text{ h}^{-1}$ y $\phi = (127,1 \pm 2,7) \text{ Bq/h}^{-1}$.

Las condiciones ambientales del interior de la cámara fueron las siguientes: $T = 19,86 \pm 0,34 \text{ }^\circ\text{C}$ $P = 1011,0 \pm 5,0 \text{ mbar}$ y humedad $H = 52,39 \pm 0,31 \text{ \%}$.

Aplicando la ecuación (4) se calcula el valor del flujo experimental, $f = 0,9 \pm 0,1 \text{ l/min}$.

Con los datos obtenidos y la ecuación (6) $C_{\text{max}} = 2160 \text{ Bq/m}^3$. Como criterio para seleccionar la región de interés se toma al haber alcanzado el 99 % de este valor, a partir de la hora 64, que es la zona sombreada en gris.

Tabla 7: Medidas de cada monitor representadas gráficamente en 15. C^* es la concentración medida sin corregir, C' la concentración con el fondo corregido y C la concentración final con el factor aplicado.

Monitor	$C^*(\text{Bq/m}^3)$	$C'(\text{Bq/m}^3)$	$C(\text{Bq/m}^3)$
AlphaGUARD	$2139,8 \pm 8,7$	2136 ± 10	2148 ± 52
RS175	2168 ± 16	2002 ± 16	2145 ± 86
RS176	2381 ± 18	2356 ± 18	2138 ± 64
RS456	2297 ± 19	2231 ± 19	2142 ± 72
RS1133	2290 ± 20	2260 ± 20	2145 ± 65
RS1148	2800 ± 20	2645 ± 20	2198 ± 75
RS1503	2405 ± 21	2395 ± 21	2121 ± 62
RS1504	2061 ± 21	2010 ± 21	2112 ± 70
RS1506	2176 ± 25	2155 ± 25	2128 ± 67
RS1507	2348 ± 18	2332 ± 18	2161 ± 64

Se ha realizado un test de Kolmogorov-Smirnov para comprobar que los datos ajustan a una distribución normal teórica. Los resultados de dicho test aparecen en la tabla 8.

Tabla 8: Análisis de la normalidad aplicando el test Kolmogorov-Smirnov para la serie de datos completa de la tabla 7.

Monitor	Medidas	Statistic	Valor p	Decisión a $\alpha = 5 \%$
AlphaGUARD	49	0,1048	0,63709	No se puede rechazar la normalidad
175	49	0,10178	0,67868	No se puede rechazar la normalidad
176	49	0,09845	0,7261	No se puede rechazar la normalidad
456	49	0,0827	0,97034	No se puede rechazar la normalidad
1133	49	0,1001	0,7024	No se puede rechazar la normalidad
1148	49	0,1105	0,56272	No se puede rechazar la normalidad
1504	49	0,09934	0,71324	No se puede rechazar la normalidad
1506	49	0,13055	0,34542	No se puede rechazar la normalidad
1507	49	0,08615	0,91432	No se puede rechazar la normalidad

Tal y como se muestra en la tabla 8 no se puede rechazar la hipótesis de que las medidas tienen su origen en una distribución normal. Con este resultado se puede proceder a realizar un test ANOVA para garantizar que las medidas son compatibles entre si.

Finalmente se realiza un test de análisis de varianza para comprobar si las medidas son compatibles entre si. El resultado de este test indica que para un intervalo de confianza $\alpha = 0,05$ las distribuciones son compatibles entre si. El valor para $F_\alpha(9, 480) = 1,96$ mientras que el valor de los fatos $F(x) = 1,41$, por lo que al ser $F(x) < F_\alpha(9, 480)$ estamos ante la hipótesis H_0

Finalmente los resultados se muestran gráficamente en la figura 15.

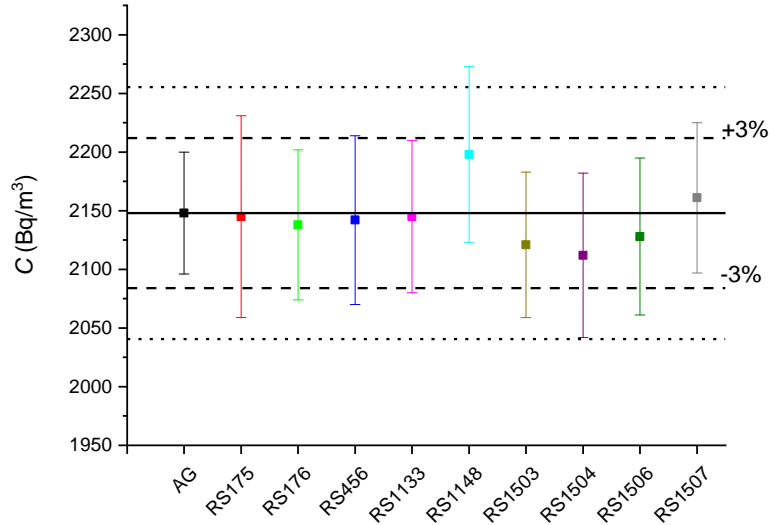


Figura 15: Comparación de las medidas corregidas de los distintos monitores empleados en la medida de la homogeneidad, cada uno de ellos dibujado con su error asociado. El monitor de referencia que marca la línea central es el AlphaGUARD. Las líneas horizontales punteadas indican una diferencia del 3 y del 5 % respecto a la referencia.

La figura 15 permite afirmar que dentro del volumen donde se han hecho las medidas la cámara es homogénea con una incertidumbre del $\xi = 3 \%$. Al menos a este nivel de confianza

se encuentra la medida mas probable. En el caso de que las medidas que se realicen sean a una concentración estable y se haga un suficiente numero de medidas, de forma que esa distribución pueda considerarse normal, se podría afirmar que la homogeneidad tiene una discrepancia menor del 3 %. Por otro lado, si las medidas no provienen de una distribución gaussiana, habría que tomar un intervalo mayor, del 5 %.

A partir de ahora, si se hace una comparación entre dos monitores se puede considerar ξ como el error de la homogeneidad.

3.5. Calibración AlphaE

Para realizar la calibración del monitor AlphaE se estabilizó la cámara en 3 valores de concentración, a 2000 Bq/m³ a 5000 Bq/m³ y finalmente a 400 Bq/m³, aproximadamente.

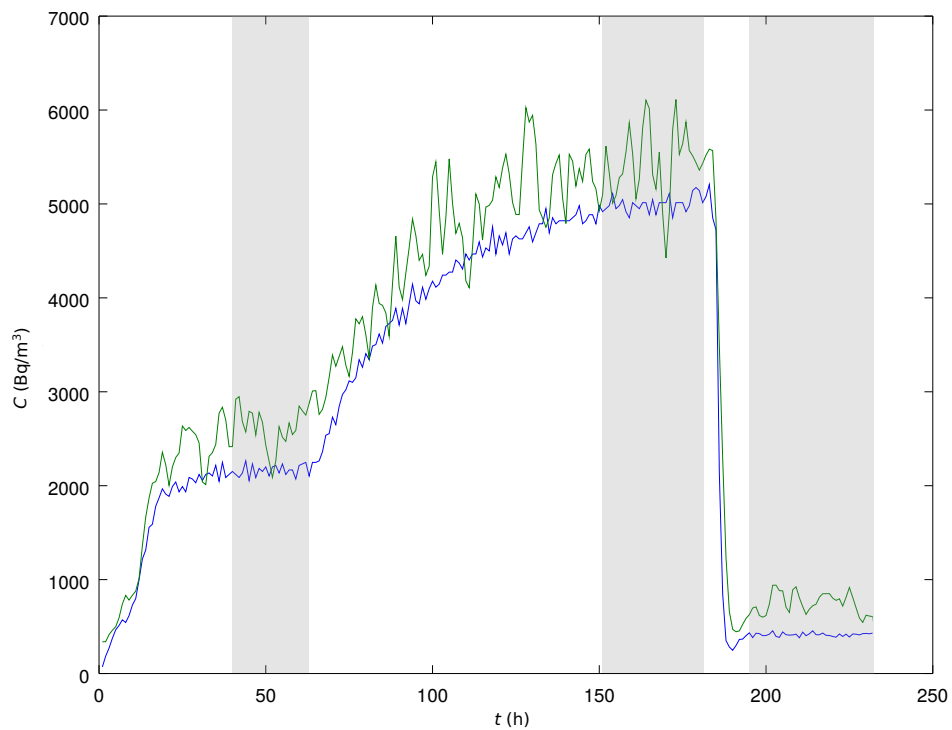


Figura 16: Medidas en bruto del AlphaGUARD (azul) y del AlphaE(verde). El valor de correlación entre las dos medidas es $R=0.97$. Las regiones ensombrecidas corresponden con la zona de estabilización de la concentración, es decir, la zona que ha sido considerada para calcular el factor.

Pese a que la correlación sea alta, el fondo elevado del monitor AlphaE hace que sus resultados tengan una desviación respecto a las medidas trazables del AlphaGUARD.

Tabla 9: Esta tabla recoge la medida directa de concentración del AlphaE, los mismos datos con el fondo corregido, el valor medio del AlphaGUARD en cada medida y el factor de calibración. Todos los datos tienen su error asociado. Las condiciones atmosféricas fueron las siguientes: $T = (21,7 \pm 0,4) ^\circ\text{C}$, $P = (1017 \pm 3) \text{ mbar}$ y $H = (55,1 \pm 0,4) \%$

Nº	$C^*(\text{Bq/m}^3)$	$C'(\text{Bq/m}^3)$	$C_{\text{ref}}(\text{Bq/m}^3)$	F
1	2618 ± 220	2339 ± 240	2161 ± 52	$0,924 \pm 0,099$
2	5450 ± 370	5170 ± 380	5000 ± 120	$0,968 \pm 0,083$
3	750 ± 110	470 ± 150	415 ± 11	$0,89 \pm 0,32$

En la tabla 9 se observa que el factor de corrección aumenta con la concentración medida. Por ello se puede plantear un ajuste para corregir el factor F para cada concentración medida de forma que $F = a + b C'$.

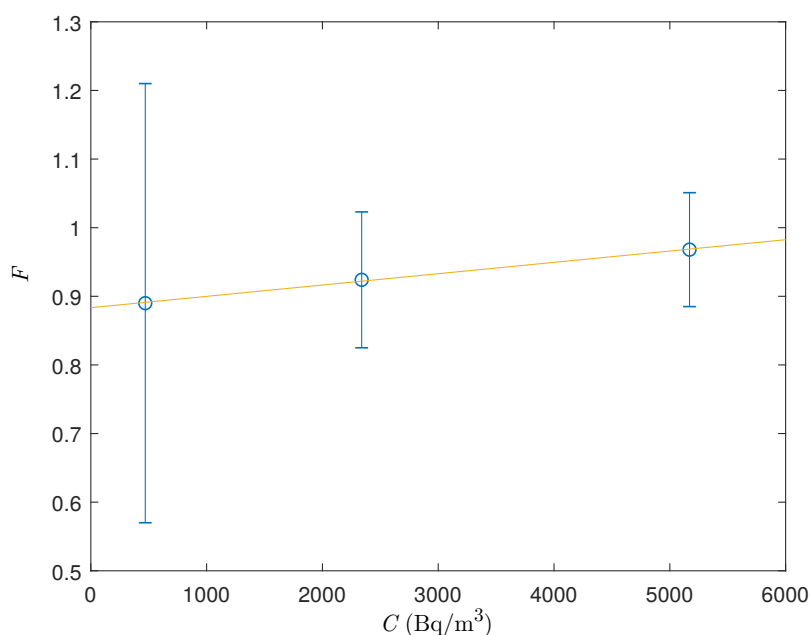


Figura 17: Ajuste del factor de calibración respecto a la concentración medida. Los parámetros que ajustan son: $a = 0,88 \pm 0,17$ y $b = (1,5 \pm 4,0) * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{Bq}$.

Este ajuste permite que al menos las medidas entre 400 y 5000 Bq/m^3 sean corregibles mediante el factor. Para utilizar esta corrección en cualquier punto se aplicara $C = C' F$ como se ha venido haciendo hasta ahora con la excepción de que F no será un valor constante si no que $F = a + b C'$.

Pese a que en la figura 17 la incertidumbre, especialmente en el factor de 400 Bq/m^3 sea muy elevada, la recta de ajuste si que pasa justo por el valor mas probable. Por ello se va a aplicar el valor para las medidas de la figura 16 para comprobar la bondad del ajuste.

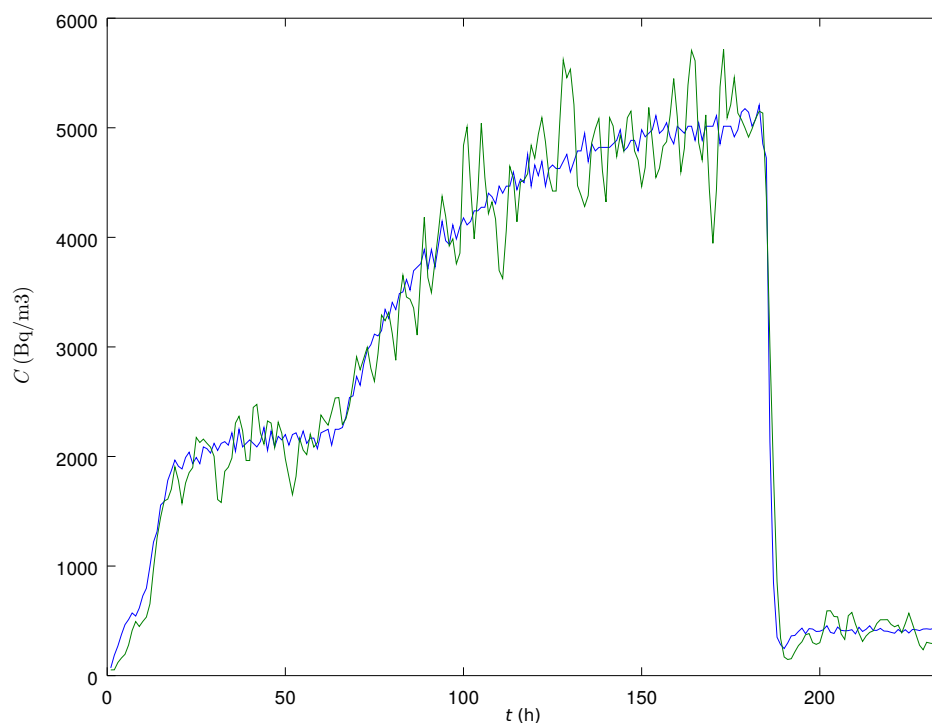


Figura 18: Corrección de las medidas de la figura 16 la ecuación de ajuste de la figura 17.

Se observa que al corregir las medidas el AlphaE oscila en torno al valor del AlphaGUARD al contrario que con la lectura directa. Aun así las oscilaciones de este monitor son bastante grandes en comparación con el AlphaGUARD.

La elevada incertidumbre a la hora de calcular el factor de calibración se debe principalmente al fondo elevado del monitor. En la tabla 9 se aprecia que el fondo del dispositivo (280 Bq/m^3) representa prácticamente una tercera parte de la señal medida, lo cual causa una gran incertidumbre en el factor de calibración.

A pesar de ello la corrección que se se realiza del monitor en la figura 18 corrige de forma significativa la medida. Las grandes oscilaciones son resultado de la baja sensibilidad del monitor, pero en el caso de que se realicen medidas prolongadas se espera que el valor promedio si que sea el correcto y pueda ser trazable.

4. Discusión

La constante de decaimiento radiactivo medida es $\lambda = (0,008041 \pm 0,000022) \text{ h}^{-1}$ y el de $\lambda_{\text{perdidas}} = (4,835 \pm 0,013) * 10^{-4} \text{ h}^{-1}$. Se va a comparar este valor con el de otras cámaras de radón de otras partes del mundo.

Algunos datos que se encuentran en publicaciones de este valor está presentado en los artículos sin valor para la incertidumbre. Debido que hay pocas publicaciones que incluyan esta información, ya sea por que los laboratorios no lo hayan medido o por que no se haya publicado, se van a presentar para tener otros valores con el que comparar esta cámara de radón.

La cámara de la East China University of Technology tiene unas pérdidas $\lambda_{\text{perdidas}} = (0,00360 \pm 0,00003) \text{ h}^{-1}$ unas 7,5 veces mayores que la cámara aquí estudiada. En ese caso, las pérdidas de la cámara suponen una tercera parte del valor de λ lo cual ya es significativo. La diferencia principal entre su cámara y la de LaRUC es el aislamiento dado que la cámara de el LaRUC es de acero mientras que la asiática es de metacrilato, que permite mayor difusión del radón [32].

En la universidad politécnica de Hong Kong se hizo un estudio para evaluar las pérdidas en pequeñas cámaras de radón (14,5 litros) obteniéndose un valor para $\lambda_{\text{perdidas}} = 0,0249 \text{ h}^{-1}$. En este caso también hay que la relación volumen superficie aumenta las pérdidas de una cámara de menor tamaño. Otra cámara que se cita en el artículo tiene un mejor resultado que esta otra siendo $\lambda_{\text{perdidas}} = 0,0071 \text{ h}^{-1}$ la diferencia entre estas cámara radica en que en la segunda se hizo en esfuerzo en mejorar el sellado, los resultados muestran la importancia de esta consideración [33].

Otro ejemplo comparativo es la cámara de la Universidad de Huelva con un valor para $\lambda_{\text{perdidas}} = (1,01 \pm 0,11) 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ valor que dobla el medido en la cámara de LaRUC. [34].

Finalmente $\lambda_{\text{perdidas}} = 0,001464$ en el caso de la cámara de radón de la universidad politécnica de Teherán [35].

Con esta comparación se ve que las pérdidas no son significativamente grandes respecto a otras cámaras de radón.

La homogeneidad establecida es $\xi = 3 \%$, también se va a comparar este resultado con los mismos de otras cámaras. Al igual que para las pérdidas, esta magnitud a veces aparece como un resultado propio del laboratorio y no hay documentación que explique como se llegó a ese resultado.

El monitor utilizado para la medida influye mucho en el resultado, por ejemplo tanto la cámara siria [36] como la malaya [37] como la de Teherán [35] tienen un valor para $\xi = 10 \%$ debido a que para la medida han utilizado monitores de trazas que tienen una incertidumbre muy elevada, por lo cual el resultado no permite hacer una buena comparación.

La cámara de Cataluña, que es la de referencia a nivel nacional, asigna a ξ un valor del 2% en una región interior de 3 m^3 , siendo la cámara de 20 m^3 [12]. En este trabajo, la región escogida fue de $0,18 \text{ m}^3$ en una cámara de 1 m^3 , por lo que la relación de la región acotada con respecto a toda la cámara es similar.

Finalmente, la cámara alemana en el laboratorio PTB considera que para su cámara hay que asumir un 2,5% de incertidumbre en su cámara.[27]

Por tanto el valor del 3% es un valor coherente con otras cámaras de referencia con reconocimiento nacional e internacional.

Los mayores inconvenientes del monitor AlphaE son su contaminación que introduce un gran error, especialmente a concentraciones bajas y la baja sensibilidad, que causa que las fluctuaciones sean elevadas y sea necesario largos periodos de medición en la estabilidad para disminuir la incertidumbre del resultado.

Se puede apreciar en la figura 16 como el monitor AlphaE necesita un tiempo mayor para adaptarse a la concentración que el Alphaguard. Tanto al aumentar la concentración como al disminuir esta, el monitor AlphaE necesita una o dos horas mas para llegar a la concentración del monitor de referencia, a mas rápida sea esta variación, mayor será este tiempo. Esto hace, que el monitor no sea adecuado para monitorizar durante periodos cortos de tiempo, lo cual no quiere decir que no sea efectivo en largos tiempo.

5. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a Carlos Sainz por la confianza depositada al haber aceptado dirigirme sin conocerme antes. A Daniel Rábago por toda la atención y consejos que me ha dedicado estos meses. Y finalmente a todo el LaRUC por haberme acogido de tal manera que me han hecho sentirme como en casa.

Bibliografía

- [1] LG Ruipérez. *El Radón y sus riesgos*. Universidad de Oviedo, 1992.
- [2] W.E. Burcham. *Física nuclear*. Reverté, 1974.
- [3] D Rábago. Caracterización de materiales para el blindaje frente a neutrones. 385, 06 2017.
- [4] Georges Audi et al. The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties. *Chinese Physics C*, 41:030001, 03 2017.
- [5] International Agency for Research on Cancer Lyon (France). *Man-made mineral fibres and radon*. IARC, 1988.
- [6] United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the general assembly, with scientific annexes*, volume 2. United nations publications, 2008.
- [7] P Howarth et al. “metrology—in short” 3rd edition. *EURAMET project*, 1011, 2008.
- [8] CIEMAT. Curso práctico de Calibración de Equipos de Protección Radiológica. SEPR, 2017.
- [9] P Felice. Primary standards of radon. *Metrologia*, 44:S82, 08 2007.
- [10] JL Picolo et al. A radon 222 traceability chain from primary standard to field detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 52(3):427–434, 2000.
- [11] R Dersch. Primary and secondary measurements of Rn-222. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 60:387–90, 02 2004.
- [12] A Vargas et al. Traceability of radon-222 activity concentration in the radon chamber at the technical university of Catalonia (Spain). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 526(3):501–509, 2004.

- [13] D Ting. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. *International Journal of Environmental Studies*, 67:100–102, 02 2010.
- [14] A Robertson et al. The cellular and molecular carcinogenic effects of radon exposure: a review. *International journal of molecular sciences*, 14(7):14024–14063, 2013.
- [15] LS Quindós. *Radón: un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Ed. Universidad de Cantabria, 1995.
- [16] CSN. Dosis de Radiación, 2010.
- [17] JD Harrison et al. Effective dose from inhaled radon and its progeny. *Annals of the ICRP*, 41(3-4):378–388, 2012.
- [18] M Fuente et al. Performance of radon monitors in a purpose-built radon chamber. *Journal of Radiological Protection*, 38, 08 2018.
- [19] Pylon Electronics Inc. Radioactive sources. Model RN-1025.
- [20] R Calin et al. Detector of ionization chamber-type in pulse mode for measurements of radon concentration in air. *Romanian Journal of Physics*, 61:1591–1603, 01 2016.
- [21] J. S. Hansen. Internal ionization during alpha decay: A new theoretical approach. *Phys. Rev. A*, 9:40–43, Jan 1974.
- [22] SARAD GmbH. Measuring Principals – Decay Statistics – Test Planning, Junio 2007.
- [23] Sarad. Radon Scout.
- [24] R B Firestone et al. WWW Table of radioactive isotopes. In *APS Division of Nuclear Physics Meeting Abstracts*, 1999.
- [25] D Arnold et al. Analysis of outdoor radon progeny concentration measured at the Spanish radioactive aerosol automatic monitoring network. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(5):833–838, 2009.
- [26] F Cardellini et al. Determination of blank indication of active radon monitors. *Applied Radiation and Isotopes*, 81:242–247, 2013.
- [27] Annette Röttger et al. Calibration of commercial radon and thoron monitors at stable activtiy concentrations. *Applied Radiation and Isotopes*, 87:44–47, 2014.
- [28] CE Metrología. Evaluación de datos de medición”Guía para el expresión de la Incertidumbre de Medida.
- [29] W.W. Daniel. *Applied nonparametric statistics*. The Duxbury advanced series in statistics and decision sciences. PWS-Kent Publ., 1990.
- [30] J P Michael. Quantiles of the Kolmogorov-Smirnov Test Statistics.
- [31] S. J. Amster. Beyond ANOVA, Basics of Applied Statistics. *Technometrics*, 29(3):387–387, 1987.
- [32] Z Xiongjie et al. Methods of kernel parameter calculation for stabilization technology of radon concentration in a closed radon chamber. *Applied Radiation and Isotopes*, 140:267–271, 2018.

- [33] C YH Chao et al. Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. *Building and Environment*, 32(4):355–362, 1997.
- [34] I López-Coto et al. Development and operational performance of a single calibration chamber for radon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(3):1135–1140, 2007.
- [35] S Heidary et al. Monitoring and measurement of radon activity in a new design of radon calibration chamber. *Radiation Measurements*, 46(8):694–700, 2011.
- [36] R Shweikani et al. Design, construct and test of a calibration radon chamber. *Radiation measurements*, 40(2-6):316–319, 2005.
- [37] Murtadha S Al-Nafey et al. Design and fabrication of new radon chamber for radon calibration factor of measurement. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3:1–6, 2012.